

TRABAJO FIN DE GRADO

(Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales)

Título Desarrollo de una estación de calidad del aire económica mediante el Internet de las Cosas

Realizado por Javier Martínez Calonge

Dirigido por Dr. Javier Fernández García

Barcelona, Septiembre de 2023

Agradecimientos

Al Dr. Javier Fernández por su dedicación, paciencia y confianza depositada en mí para la realización de este trabajo. Aunque durante todo el Grado de Ingeniería Industrial, no hemos coincidido en ninguna materia, ni laboratorio, ha sido un placer colaborar a lo largo del trabajo.

Al Dr. Giovanni Gómez por su implicación, ayuda como tutor de grado y por haber abierto las puertas del laboratorio GEPI para la impresión 3D.

A mi familia, que siempre ha estado conmigo en todos los momentos de mi vida y que me han animado para seguir adelante.

A los amigos de la universidad, especialmente al grupo de *Avalon* por el día a día, manteniendo la ilusión y los buenos momentos durante todo este tiempo. Quiero destacar a Oriol Torrell, por la ayuda prestada en impresión 3D y los ánimos para finalizar este trabajo.

Resumen

En este trabajo, se ha diseñado y programado una estación de calidad de aire basada en la tecnología del Internet de las Cosas, con un gran énfasis en el bajo coste y en la facilidad de implementación. Además, se ha creado un sistema de guardado de los datos en la nube y una visualización en un panel de control con el objetivo de monitorizar e informar claramente al usuario final. Se ha observado el comportamiento de los sensores de detección de gases contaminantes en diferentes entornos para analizar la respuesta de estos y observar su viabilidad.

Para el trabajo se ha utilizado la placa de desarrollo Olimex ESP32-EVB que cuenta con una amplia gama de prestaciones técnicas. Se ha configurado y programado en el entorno de Arduino IDE todos los sensores y dispositivos presentes. Las variables que han sido medidas son la temperatura, humedad relativa, dióxido de carbono (CO2), partículas en suspensión (PM2.5 y PM10), monóxido de carbono (CO) y el dióxido de nitrógeno (NO2) gracias a los sensores SEN0338, SCD30, SDS011 y Multichannel Gas Sensor V2. Los datos medidos son guardados localmente en la tarjeta microSD de la placa, y asimismo son enviados y visualizados en dos programas en la nube, InfluxDB y Grafana, los cuales servirán para el guardado de datos y la monitorización en panel de control respectivamente.

Para la facilidad de uso y transporte móvil de la placa y de los sensores, se ha diseñado dos cajas por impresión 3D con PLA, que integran todos los elementos para obtener una estación portable de calidad del aire.

Palabras clave: Calidad del aire, Internet of Things, bajo coste, Arduino, Grafana.

Resum

En aquest treball, s'ha dissenyat i programat una estació de qualitat de aire basada en la tecnologia Internet de les Coses, amb un gran èmfasi en el baix cost i en la facilitat de implementació. A més a més, s'ha creat un sistema de emmagatzematge per les dades en línia i una visualització en un panell de control, amb el objectiu de monitoritzar i informar nítidament al usuari final. S'ha observat el comportament dels sensors de detecció de gasos contaminants en diferents entorns per analitzar la resposta d'aquests i observar la viabilitat d'aquests.

Per al treball s'ha utilitzat la placa de desenvolupament Olimex ESP32-EVB que compta amb una amplia gamma de prestacions tècniques. S'ha configurat i programat en el entorn de Arduino IDE tots els sensors i dispositius presents. Les variables que han sigut mesurades son la temperatura, la humitat relativa, diòxid de carboni (CO2), partícules en suspensió (PM2.5 i PM10), monòxid de carboni (CO) i el diòxid de nitrogen (NO2) gràcies als sensors SEN0335 , SCD30, SDS011 i Multichannel Gas Sensor V2. Les dades mesurades son

guardades localment en la targeta microSD i així mateix son enviades i visualitzades en dos programes en línia, InfluxDB i Grafana, els quals serveixen per a salvar les dades i la monitorització en panell de control respectivament.

Per a la facilitat d'ús i el transport mòbil de la placa i els sensors, s'ha dissenyat dos caixes per impressió 3D amb PLA, que integren tots els elements per obtenir una estació de qualitat de l'aire portable.

Paraules clau: Qualitat del aire, Internet of Things, baix cost, Arduino, Grafana.

Abstract

In this dissertation, it has been designed and programmed an air quality station based on Internet of Things, with a close relationship between low-cost and an easy implementation. Moreover, it has been created a data-logger and a dashboard in the cloud, with the sole objective of monitoring and informing the user with a clear interface. It has been observed the performance of various gas sensors in various environments for the analysis and validation.

This thesis has been achieved with the developing board Olimex ESP32-EVB that includes a huge array of technical benefits. It has been configured and programmed with the Arduino IDE environment all the gas sensors and electronics involved. The variables to study have been the temperature, relative humidity, carbon dioxide (CO₂), particle matter (PM2.5 and PM10), carbon monoxide (CO) and nitrogen dioxide (NO₂) thanks to the sensors SEN0335, SCD30, SDS011 I Multichannel Gas Sensor V2. The data recollected have been save locally in a microSD card and in two online software, InfluxDB and Grafana, which they offer us with the storage and monitorization with a dashboard respectively.

For the ease of use and mobile transportation of the board and the sensors, it has been designed two PLA boxes with 3D printing technology, that integrates all gadgets in a portable air quality station.

Key words: Air Quality, Internet of Things, low-cost, Arduino, Grafana.

Índice

Agradecimientos	I
Resumen	II
Resum.....	II
Abstract.....	III
Listado de Figuras	VI
Listado de Tablas	IX
Listado de Gráficos	IX
Glosario.....	X
1. Introducción	1
1.1 Objetivos.....	3
1.2 Estructura del Trabajo de Fin de Grado	4
2. Normativa	5
3. Estado del arte.....	8
3.1. Estaciones de calidad de aire.....	8
3.2. Índice de Calidad del Aire.....	10
3.3. Variables significativas	12
3.3.1. Dióxido de carbono (CO ₂).....	12
3.3.2. Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	12
3.3.3. Monóxido de Carbono	13
3.3.4. Partículas en suspensión inferiores a 10 micras (PM10) y a 2.5 micras (PM2.5)	13
.....	13
3.3.5. Temperatura y humedad	14
3.4. Tecnología MEMS para detección de gases.....	15
4. Estudio de viabilidad.....	17
4.1. Hardware	17
4.1.1. Olimex ESP32	17
4.1.1. Pantalla Olimex MOD-LCD2.8RTP	18

4.1.2. Ventilador Nidec	19
4.1.3. Sistema de alimentación secundaria y autonomía de la estación	19
4.2. Sensores.....	20
1.2.1. Sensores para la detección de temperatura y humedad relativa	21
4.2.1.1. BME280	22
4.2.1.2. SHT11.....	23
4.2.2. Sensores de medición de CO2.....	24
4.2.2.1 Sensirion SCD30	25
4.2.3. Sensores de partículas en suspensión.....	27
4.2.3.1. PM Nova Sensor SDS011	27
4.2.4. Sensores de CO y NO ₂	29
4.2.4.1. SeeedStudio Multichannel Gas sensor v2	30
4.3. Protocolos de comunicación.....	31
4.3.1. Serial Peripheral Interface	31
4.3.2. I2C – Inter-Integrated Circuit	31
4.3.3. UART – Universal Asynchronous Receiver/Transmitter	32
4.4. Software de código - Arduino IDE	33
4.5. Plataformas y aplicaciones de toma de datos y visualización en la nube.....	34
4.5.1. InfluxDB Cloud.....	35
4.5.2. Grafana Cloud	38
4.6. Código	41
1.6.1. Sistema integrado.....	42
4.7 Otros softwares.....	42
4.7.1. MathWorks ThingSpeak	42
4.7.2. Google Firebase	43
5. Memoria técnica	44
5.1. Diseño y ensamblaje de la estación de calidad del aire.....	44
5.2. Prueba de calibración de temperatura	47

5.3. Prueba de calibración y linealidad del sensor SCD30	49
5.4. Sensor SeeedStudio Multichannel V2	53
5.4.1. GM-102B	53
5.4.2. GM-702B	54
5.5. Prueba integral de los sensores frente a la salida de gases de automoción	55
5.6. Implementación de monitorización continua en vivienda	59
6. Valoración económica e impacto medioambiental	60
6.1. Costes.....	60
6.2. Impacto Medioambiental	61
7. Cronograma	61
8. Conclusiones	62
8.1. Líneas de mejora	63
9. Bibliografía	63
10. Planos	69

Listado de Figuras

Figura 1 Evaluación sobre la polución aérea de España 2022 de la OMS	1
Figura 2. Arquitectura del IoT. Fuente: IEEE[4]	2
Figura 3 Ejemplo de aplicación IoT del parking en Belgrado (Serbia). Fotografía personal...2	2
Figura 4 Fotografía de la refinería de Tarragona (agosto 2023)	3
Figura 5 Cronología del marco legal sobre la calidad del aire a nivel europeo y nacional	5
Figura 6 Mapa de la ZBE de Barcelona [10]	7
Figura 7 Estación Fija en Puigdelfí (Tarragona).....	9
Figura 8 Dispositivo GW40.0006 de calidad de aire.[14]	10
Figura 9 Índice Nacional de Calidad de Aire	11
Figura 10 Portal web del Índice Nacional de la Calidad del Aire del Gobierno de España [15]	
.....	11
Figura 11 Evolución del VLA de NO ₂ en las zonas de medición en España.....	13

Figura 12 Contaminación de Barcelona (Mané Espinosa) [20].....	14
Figura 13 Efectos de la temperatura y la humedad relativa en el sensor GM-102B.....	15
Figura 14 Temperaturas registradas 23/08/2023 en terraza.....	15
Figura 15 Sensor MEMS al lado de una moneda	16
Figura 16 Esquema de diseño de un sensor de gas MEMS de tipo óxido metálico [23]	16
Figura 17 Pinout de la placa Olimex© ESP32-EVB-EA	18
Figura 18 Pantalla Olimex	19
Figura 19 Ventilador Nidex F251R	19
Figura 20 Batería Mikroe 3.7V LiPo y el módulo Adafruit bq24074	20
Figura 21 Fotografía del sistema de alimentación con la placa 1.5W, Adafruit bq02222 y la batería LiPo	20
Figura 22 Sensores DHT11 y DHT22 [30].....	22
Figura 23 Chip BME280 y su gráfica de operación según temperatura	23
Figura 24 Chip del sensor SHT31	23
Figura 25 Longitudes de onda Infrarrojas [37]	25
Figura 26 Esquema general de un sensor NDIR [38]	26
Figura 27 Esquema del módulo SCD30	26
Figura 28 Esquema de funcionamiento del PM sensor SDS011 [44]	28
Figura 29 Posición correcta para el funcionamiento del sensor de partículas [39].....	29
Figura 30 Especificaciones del MICS-6874 [45]	29
Figura 31 Sensor Multichannel Gas Sensor y esquema de chips GM-MEMS[46].....	30
Figura 32 Diagrama de esquema de funcionamiento del SPI.....	31
Figura 33 Topología de la conexión UART [56]	32
Figura 34 Esquema de conexiones de la estación.....	33
Figura 35 Logo de la empresa Arduino	33
Figura 36 Arduino IDE	34
Figura 37 Características generales del plan gratuito de InfluxDB Cloud.....	36
Figura 38 Librerías disponibles para la subida de datos a InfluxDB	36
Figura 39 Creación del bucket.....	37

Figura 40 Código Arduino con las direcciones necesarias para el envío de datos a InfluxDB	37
Figura 41 Explorador de datos del software InfluxDB	38
Figura 42 Grafana Cloud	38
Figura 43 Características del plan gratuito de Grafana Cloud	39
Figura 44 Inicio de configuración de Grafana Cloud	39
Figura 45 Creación del API Token en InfluxDB para el uso de Grafana.....	39
Figura 46 Cargar datos desde InfluxDB	39
Figura 47 Configuración para el acceso de datos de InfluxDB	40
Figura 48 Creación de visualizaciones.....	40
Figura 49 Opciones de visualización	41
Figura 50 Visualización en Grafana	41
Figura 51 Sistema integrado de la estación de calidad del aire.....	42
Figura 52 Visor de datos de ThingSpeak	43
Figura 53 Visor a tiempo real de Firebase	44
Figura 54 Primer diseño de la estación	45
Figura 55 Impresora Prusa i3 dañada por error en impresión.	45
Figura 56 Modelos en SolidWorks de las dos cajas que forma la estación de calidad de aire	46
Figura 57 Principio de impresión y la impresora Ultimaker	46
Figura 58 Prueba de temperatura	48
Figura 59 Torre de destilación con los dispositivos de medición en cabeza.	49
Figura 60 Caudalímetros de aire seco (izquierda) y de CO ₂ (derecha)	50
Figura 61 Detalle de la toma de datos en cabeza	50
Figura 62 Monitorización y evolución con Grafana del NO ₂ (07/08/2023) en aire limpio.	53
Figura 63 Monitorización y evolución con Grafana del NO ₂ durante 24 horas (03/08/2023) en aire limpio	54
Figura 64 Monitorización de los datos de CO en aire limpio.	54
Figura 65 Monitorización y evolución con Grafana del CO durante 24 horas (03/08/2023) en aire limpio.	55

Figura 66 Prueba de gases, Lexus híbrido (izquierda) y Mazda MX-5 (derecha).....	56
Figura 67 Monitorización de Grafana del CO2 del sensor SCD30	56
Figura 68 Monitorizaciones del NO2, CO y partículas en suspensión mediante Grafana	57
Figura 69 Configuración aplicada de colores de Grafana para el CO	58
Figura 70 Configuración de colores de Grafana para el NO2	58
Figura 71 Datos recopilados temperatura y humedad en Reus.....	59
Figura 72 Cronograma.....	62

Listado de Tablas

Tabla 1 Mercado de sensores de temperatura y humedad relativa	21
Tabla 2 Sensores de CO2 compatibles con Arduino IDE	24
Tabla 3 Sensores de partículas en suspensión para Arduino IDE	27
Tabla 4 Table de reactivos	47
Tabla 5 Costes.....	60

Listado de Gráficos

Gráfico 1 Prueba de temperatura en el sensor BME280	48
Gráfico 2 Primera prueba de linealidad del SCD30	51
Gráfico 3 Segunda prueba linealidad del SCD30.....	52

Glosario

Abreviación	Concepto
IoT	Internet of Things- Internet de las Cosas
ICA	Índice de Calidad del Aire
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
I2C	Inter-Integrated Circuit
SPI	Serial Peripheral Interface
PM	Particle Matter
CSV	Comma Separated Values
GPIO	General Purpose Input/Output
SDA	System Data
SCL	System Clock
RX	Receiver
TX	Transmitter
UEXT	Universal EXTension-Connector
MISO	Master Input, Slave Output
MOSI	Master Output, Slave Input
SCLK	Serial Clock
SS	Slave Select
microSD	Micro Save Disk
IDE	Integrated Design Environment
TFT	Thin Film Transistor
LCD	Liquid Crystal Display
LiPo	Litio-Polímero
PCB	Printed Circuit Board
DIY	Do It Yourself

1. Introducción

La calidad del aire es una problemática que durante años sigue siendo una de las preocupaciones más importantes por la población mundial. El efecto invernadero y el desplazamiento de las comunidades a unas urbes más atomizadas, han resultado en el incremento del malestar por la pésima calidad de aire que se respira en ellas. Siendo los principales emisores: el gran flujo de tráfico, industrias y una la sobreexplotación humana de los recursos agrícolas, ganaderos y naturales. La pandemia del COVID-19, también ha sido uno de los motivos que ha resucitado este debate ya que varios estudios apuntan a que los contaminantes del aire como las partículas en suspensión, dióxido de nitrógeno podrían estar favoreciendo la presencia y longevidad del virus de las SARS-CoV-2.[1]

Según el OMS [2] y los informes de evaluación de calidad del aire de España se encuentra con diversos problemas importantes en cuanto algunos contaminantes atmosféricos como las partículas de tamaño 2.5 (PM_{2.5}) que principalmente en las urbes, se calcula que en 2021 y analizando más internamente los informes de calidad de aire, el dióxido de nitrógeno sigue siendo uno de los principales agentes contaminantes junto mortales de nuestro país. [3]

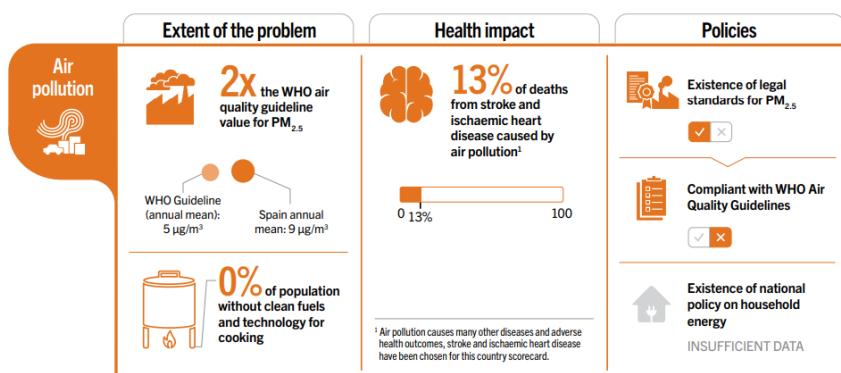


Figura 1 Evaluación sobre la polución aérea de España 2022 de la OMS

El internet de las cosas ha significado un gran paso en la democratización de la electrónica y la tecnología, dando un uso más integro y fácil para el ciudadano de a pie. Uno de los campos más interesantes y que nos implica en este trabajo, es la implementación de esta tecnología en el monitoreo, análisis y gestión de gases contaminantes. El Internet de las Cosas nos ofrece la posibilidad una infinidad de dispositivos que evalúan e informen a tiempo real de la presencia de contaminantes o alteraciones en el entorno, que puedan ser perjudiciales para la población o para el proceso que se esté llevando a cabo [4]. Aun así, el abanico de posibilidades del IoT es muy amplio y en constante expansión, ofreciendo soluciones desde el consumidor hasta autoridades gubernamentales y empresas de todo tipo de sectores, como se aprecia en la Figura 2.

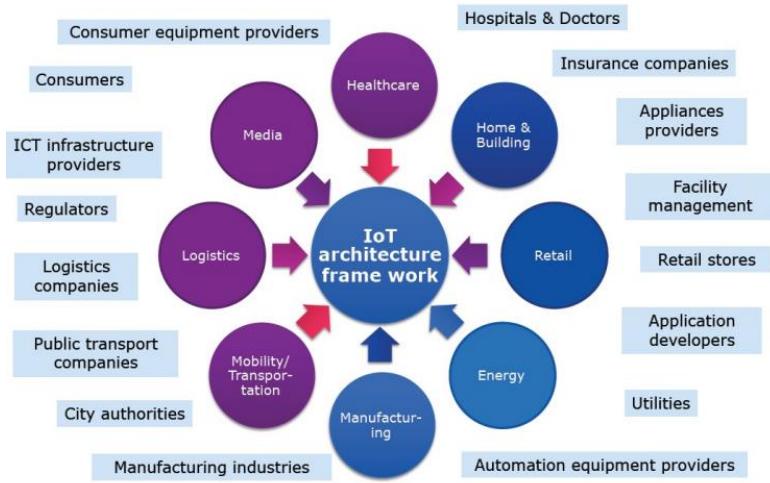


Figura 2. Arquitectura del IoT. Fuente: IEEE[4]



Figura 3 Ejemplo de aplicación IoT del parking en Belgrado (Serbia). Fotografía personal.

El principal factor y motivación personal para realizar este trabajo, ha sido la realidad de la zona donde me he criado y he crecido. Vivo en una región con una fuerte industria petroquímica, la cual es sin duda, uno de los motores económicos y de poder industrial del Camp. No obstante, prácticamente cada mes se pueden observar imágenes como la Figura 4 desde las ventanas de las poblaciones colindantes. Estas imágenes crean alerta sobre la calidad del aire de nuestro entorno. Si buscamos información sobre la calidad del aire de la zona en las estaciones de medición cercanas, nos daremos cuenta de que las instaladas están lejos de la zona implicada o dentro de las dos ciudades de Reus y Tarragona, donde

los registros principalmente indican la polución de origen urbano. Sumado al silencio de las autoridades y de los medios de comunicación, se crea un malestar y una falta de información sobre cual es el aire que realmente estamos inhalando en nuestro día a día, y que consecuencias tendrá en el futuro.



Figura 4 Fotografía de la refinería de Tarragona (agosto 2023)

1.1 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es el estudio, diseño, construcción y monitorización de la calidad del aire utilizando las nuevas tecnologías IoT y con diferentes sensores disponibles en el mercado. Después de la adquisición de los sensores se procederá a buscar el software que mejores prestaciones nos depara el procesamiento de datos y sobre todo la visualización de estos. Entre otros objetivos encontramos:

- Bajo coste económico: La estación tiene que implementar sensores de bajo coste económico, así como el entorno plataformas de soporte gratuitas.
- Técnicamente viable tanto en la implantación, los costes y la integración de todos los sistemas.
- Visualización: La información recogida por los sensores tiene que estar representada de tal forma que el usuario pueda visualizarla nítidamente.
- Creación, diseño y puesta a punto de una estación portable física y prueba de sensores utilizando las tecnologías disponibles en la universidad o personal.

1.2 Estructura del Trabajo de Fin de Grado

Para la realización de este Trabajo de Final de Grado se ha estructurado en los siguientes capítulos:

Capítulo 1: Introducción. Se presenta la problemática surgida, los objetivos y la motivación personal del Trabajo de Fin de Grado.

Capítulo 2: Normativa. Marco legislativo que afecta a la calidad del aire desde las administraciones locales a la Unión Europea.

Capítulo 3: Estado del arte. Breve marco teórico con los conceptos más importantes o significativos para el transcurso del trabajo.

Capítulo 4: Estudio de viabilidad. Se detallan las especificaciones técnicas de los dispositivos hardware y software utilizados.

Capítulo 5: Marco técnico. Conjunto de pruebas realizadas para validar y analizar el comportamiento de los sensores adquiridos y el ensamblaje e implementación de la estación de calidad de aire.

Capítulo 6: Valoración económica e impacto ambiental. Costes e impacto ambiental.

Capítulo 7 Cronograma. Cronograma con la organización y tiempo empleado en las diferentes tareas del trabajo.

Capítulo 8: Conclusiones. Conclusiones del trabajo y comentario sobre las líneas futuras de trabajo y aspectos de mejora.

Capítulo 9: Bibliografía.

Capítulo 10: Planos. Planos de la estación de calidad de aire en SolidWorks2022.

2. Normativa

La calidad del aire lleva siendo uno de los principales problemas que la Unión Europea tiene que hacer frente de cara al futuro, debido a ser una de las causas de muerte prematura de los ciudadanos europeos [5], teniendo un impacto mucho superior a los accidentes de tráfico. No solo tiene un efecto perjudicial a la salud humana, sino que también perjudica al ecosistema, a la economía y al desarrollo sostenible.

Las normativas aplicadas en España al control y monitoreo de la calidad del aire vienen estrechamente definidas y condicionadas por el marco legislativo y ejecutivo de la Unión Europea.

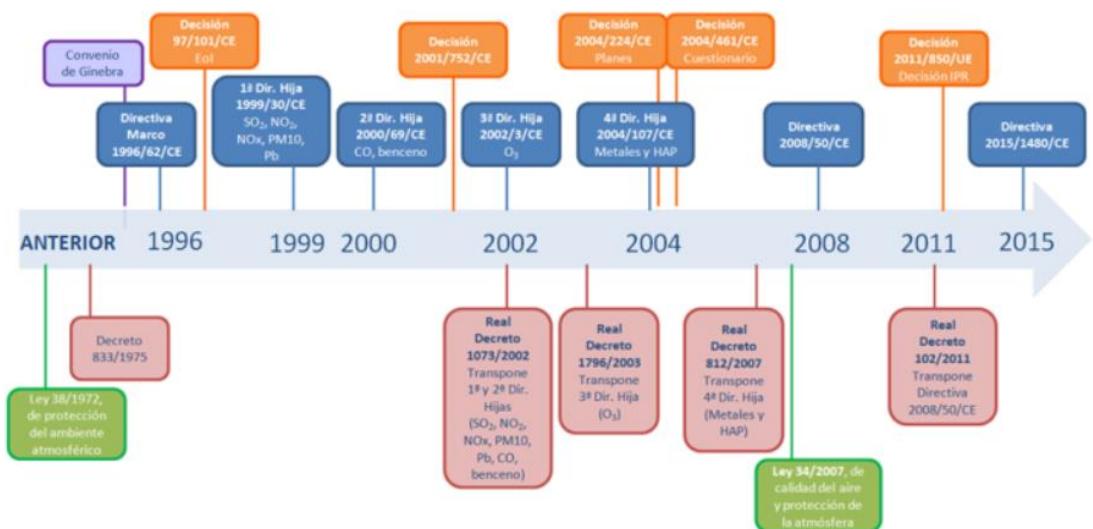


Figura 5 Cronología del marco legal sobre la calidad del aire a nivel europeo y nacional

- Normativa europea [6]:

- **Directiva 2004/107/CE** del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de diciembre de 2004, relativa al arsénico, el cadmio, el mercurio, el níquel y los hidrocarburos aromáticos policíclicos en el aire ambiente.

La cuarta Directiva Hija de la Directiva Marco original que sigue estando en vigor actualmente. Esta norma indica los valores objetivo de las sustancias previamente mencionadas y sus efectos nocivos a la salud humana a su exposición.

- **Directiva 2008/50/CE** del Parlamento Europeo y del Consejo, de 21 de mayo de 2008, relativa a la calidad del aire ambiente y una atmósfera limpia.

Esta directiva es considerada como la más importante ya que sustituye a la antigua Directiva Marco (Directiva 96/62/CE, sobre la evaluación y gestión de la calidad del

aire ambiente), así como las tres primeras Directivas Hijas: 199/30/CE, 2000/69/CE y la 2002/CE. Estas últimas hacían referencia los valores límite de diversos gases y sustancias contaminantes.

Esta directiva también fue la primera en introducir nuevas regulaciones para las partículas de tamaño inferior a 2,5 micrómetros (PM2.5), las cuales no se consideraban hasta la fecha. Asimismo, se introducían nuevos requisitos en cuanto evaluación y objetivos de calidad de aire, siguiendo las indicaciones de la Organización Mundial de la Salud.

- **Directiva 2015/1480/UE de la Comisión, de 28 de agosto de 2015, por la que se modifican varios anexos de las Directivas 2004/107/CE y 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo en los que se establecen las normas relativas a los métodos de referencia, la validación de datos y la ubicación de los puntos de muestreo para la evaluación de la calidad del aire ambiente.**
- **Decisión de ejecución de la Comisión 2011/850/UE, de 12 de diciembre de 2011, por la que se establecen disposiciones para las Directivas 2004/107/CE y 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo en relación con el intercambio recíproco de información y la notificación sobre la calidad del aire ambiente.**

La Comisión Europea tendrá que ser informada por los Estados miembros de todo el sistema de evaluación

- Normativa estatal [7]:
 - **Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera.**

Tiene como objetivo habilitar al gobierno establecer la base legal en materia de prevención, vigilancia y reducción, así como los requisitos mínimos de los sistemas de evaluación. Actúa como el marco regulador para los planes nacionales, autonómicos y locales correspondientes a la mejora de calidad del aire.

- **Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire.**

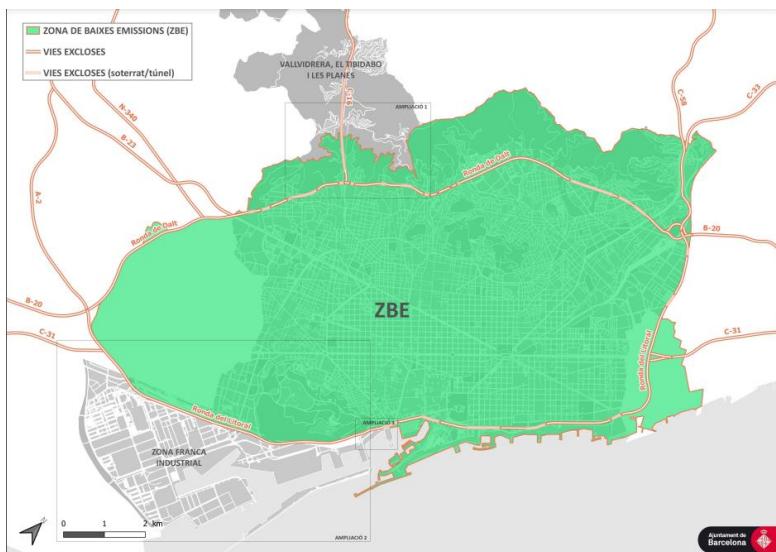
Trasposición al marco jurídico de España de la Directiva 2008/50/CE y la Directiva 2004/107/CE.

Posteriormente fue modificado por:

- **Real Decreto 678/2014, de 1 de agosto.**
- **Real Decreto 39/2017, de 27 de enero.**
- **Real Decreto 773/2017, de 28 de julio.**
- **Real Decreto 34/2023, de 24 de enero.**

- **Orden TEC/351/2019**, de 18 de marzo, por la que se aprueba el Índice Nacional de Calidad del Aire.
- Normativa catalana [8]
 - **Ley 22/1983**, de 21 de noviembre, de Protección del ambiente Atmosférico.
 - **Decreto 322/1987**, de 23 de septiembre de despliegue de la Ley 22/1983
 - **Decreto 152/2007**, de 10 de julio, aprobación del Plan de actuación para la mejora de la calidad del aire en los municipios declarados zonas de protección especial del ambiente atmosférico mediante el Decreto 226/2006.

Dentro de cada región o urbe existen normativas que regulan la materia de calidad de aire internamente, siempre cumpliendo con las normativas nacionales o de estamento superior. Un ejemplo se encuentra en la ciudad de Barcelona, donde se aplican restricciones al uso del automóvil en determinadas zonas, con el fin de reducir las emisiones de contaminantes a la atmósfera, y, por ende, mejorar la calidad del aire de la urbe. Una de las razones por la cual se aplica es la pésima calidad del aire con respecto a niveles de partículas en suspensión y dióxido de nitrógeno [9] .



informe de la OMS sobre las Pautas de la Calidad del Aire, publicado el 22 de septiembre de 2021.

Entre las propuestas se encuentran diferentes cambios significativos como:

- Reducción del 50% del límite anual de PM2.5.
- Mejora en la ayuda del monitoreo, modelaje y planes de calidad de aire.
- Mejoras en el marco legislativo, acceso a la justicia, mitigación de daños, sanciones y mejorar la comunicación entre el ciudadano y la administración.
- Unificación de las dos Directivas a una sola, para una mayor simplificación y clarificación de las normas.

3. Estado del arte

Se ha realizado un breve repaso teórico de diferentes conceptos, variables significativas y tecnologías empleadas en la monitorización, análisis y seguimiento de la calidad de aire, sensores y el Internet de las Cosas.

3.1. Estaciones de calidad de aire

En la actualidad existen diferentes tipos de estaciones para el monitoreo de la calidad del aire. Pero se pueden diferenciar entre dos, las estaciones de referencia oficiales y las pequeñas estaciones y/o dispositivos únicos.

Las estaciones de referencia son aquellas que son instaladas por las autoridades gubernamentales de cada país, y son las encargadas de la evaluación real de la calidad del aire. En España, estas estaciones son dirigidas por el Ministerio Para la Transición Ecológica y Reto Demográfico y cuenta con una red de 600 estaciones fijas por todo el territorio nacional [12] . La información está abierta al ciudadano des del año 2001 hasta los últimos datos oficiales publicados, los cuales se presentan 9 meses después del final del año. La tipología de estación va en función de la fuente de emisión siendo: estaciones de tráfico, estaciones industriales o estaciones de fondo.

Los contaminantes que son analizados por estas estaciones son:

- Dióxido de azufre (SO₂): Para la protección de la salud y ecosistemas.
- Dióxido de nitrógeno (NO₂): Protección de la salud
- Óxidos de nitrógeno (NO_x): Protección de la vegetación
- Partículas en suspensión de tamaño inferior a 10 micrómetros (PM10) y de tamaño inferior a 2.5 micrómetros (PM2,5)
- Plomo (Pb)
- Benceno (C₆H₆),
- Monóxido de carbono (CO)

- Ozono (O₃): Protección de la salud y protección de la vegetación
- Arsénico
- Cadmio
- Níquel
- Benzo(a)pireno (B(a)P).



Figura 7 Estación Fija en Puigdelfí (Tarragona)

Las pequeñas estaciones o dispositivos son principalmente aparatos electrónicos con la finalidad de analizar un gas contaminante o un conjunto muy específico. Estos indicadores son ampliamente utilizados en interiores, industrias o entornos de oficinas. Diversas empresas comercializadoras de estos dispositivos integran en su producto plataformas online de monitoreo según las demandas del cliente. [13], [14]



Figura 8 Dispositivo GW40.0006 de calidad de aire.[14]

3.2. Índice de Calidad del Aire

El Índice Nacional de Calidad del Aire es un sistema de monitorización de calidad de aire que integra las estaciones de la red estatal de calidad de aire a tiempo real.

Se definen 6 categorías de calidad de aire y un color RGB:

- Buena (azul): 56, 162, 206
- Razonablemente buena (verde): 50, 161, 94
- Regular (amarillo): 241, 229, 73
- Desfavorable (rojo): 200, 52, 65
- Muy desfavorable (granate): 110, 22, 29
- Extremadamente desfavorable (morado): 162, 91, 164
- Sin datos (gris oscuro): 85, 89, 93

SO ₂		PM2,5		PM10		O ₃		NO ₂		CATEGORÍA DEL ÍNDICE
0	100	0	10	0	20	0	50	0	40	BUENA
101	200	11	20	21	40	51	100	41	90	RAZONABLEMENTE BUENA
201	350	21	25	41	50	101	130	91	120	REGULAR
351	500	26	50	51	100	131	240	121	230	DESFAVORABLE
501	750	51	75	101	150	241	380	231	340	MUY DESFAVORABLE
751-1250		76-800		151-1200		381-800		341-1000		EXTREMADAMENTE DESFAVORABLE

* Los valores de todos los contaminantes de la tabla están expresados en µg/m³

Figura 9 Índice Nacional de Calidad de Aire

El Gobierno de España, tras la aprobación de la **Orden TEC/351/2019**, facilitó al ciudadano la web a tiempo real del estado de la calidad de aire de las estaciones de monitorización presentes en toda la geografía estatal.

No obstante, estos datos a tiempo real **no** son considerados como oficiales por el Ministerio hasta su publicación en los documentos oficiales tras el periodo antes mencionado de 9 meses. Se deben de tomar estos datos como provisionales y no validados.

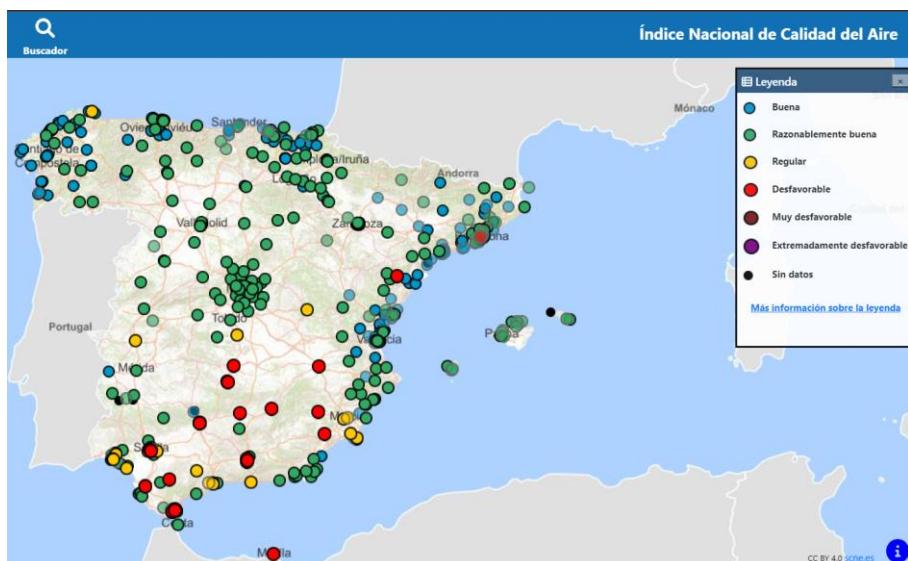


Figura 10 Portal web del Índice Nacional de la Calidad del Aire del Gobierno de España [15]

3.3. Variables significativas

3.3.1. Dióxido de carbono (CO₂)

El dióxido de carbono es un gas incoloro, inodoro y el principal causante del efecto invernadero. Cabe destacar que el CO₂ es un elemento presente en la atmósfera de forma natural, pero su concentración ha aumentado exponencialmente en las últimas décadas debido principalmente a la actividad humana relacionada con la industria y quema de combustibles fósiles. Los efectos de este incremento de emisiones repercuten en el entorno provocando un aumento del riesgo de pérdida de biodiversidad, incendios, aumento de la temperatura global y limitaciones en los cultivos.[16], [17]

Actualmente se estima que, a junio 2023, la concentración de CO₂ global se encuentra en 423 ppm, y en aumento cada mes/año.

3.3.2. Dióxido de nitrógeno (NO₂)

El dióxido de nitrógeno es un gas de color rojizo o marrón con un olor bastante fuerte y desagradable. Los agentes emisores son principalmente la combustión de combustibles a alta temperatura provocada principalmente por los medios transporte, las industrias y la generación energética.

El contacto del dióxido de nitrógeno con diferentes sustancias químicas y la radiación solar provoca una reacción por la cual se forma ácido nítrico, el cual es el constituyente principal de la lluvia ácida. Además, la reacción del gas con la luz solar permite la formación del ozono a nivel de suelo (no el contenido en la atmósfera superior), el cual es un gas oxidante y muy perjudicial para la salud humana.

Tras el transcurso del 2022 no se superó el valor límite horario (200 µg/m³ no más de 18 ocasiones) en España por segundo año consecutivo, sin embargo, sí que hubo una superación en el valor límite anual (40 µg/m³) en la ciudad Barcelona, concretamente en el Eixample. Esta estación registró una media anual de 42 microgramo/m³.

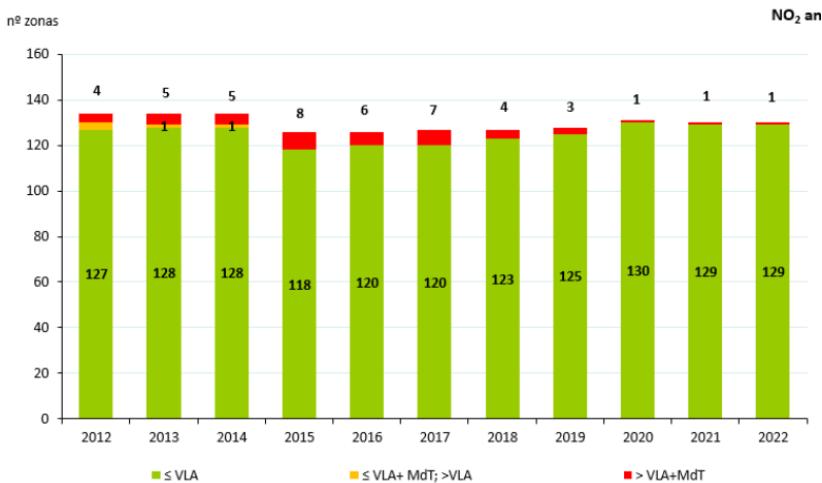


Figura 11 Evolución del VLA de NO₂ en las zonas de medición en España

En la Figura 11 podemos observar como a lo largo de los años se ha reducido las alertas por superación del VLA. Esto es debido a que la principal emisión del gas es el tráfico urbano y con la llegada del COVID-19 y las medidas restrictivas al automóvil impuestas en la ciudad condal, han favorecido estos resultados. Sin embargo, el NO₂ sigue siendo junto a las partículas en suspensión, los contaminantes más preocupantes en Barcelona y otras urbes.

3.3.3. Monóxido de Carbono

El monóxido de carbono (CO) es un gas tóxico incoloro, insípido e incoloro producido principalmente por las combustiones incompletas. Estas combustiones proceden principalmente de la quema de madera, petróleo, gas natural y queroseno. Los agentes que participan en la emisión de este gas tóxico son principalmente los motores de vehículos.

El monóxido de carbono también se autodenominado como el “asesino silencioso” [18], debido a que el humano no tiene manera de detectarlo. El monóxido de carbono se difunde desde los tejidos pulmonares tras inhalación, hasta las vías sanguíneas provocando la obstaculización de la toma de oxígeno por parte de las células. Una relativa breve exposición a este gas resulta en la muerte.

En 2022, España no registró en ninguna estación una superación del valor límite de CO (10 mg/m³). [3]

3.3.4. Partículas en suspensión inferiores a 10 micras (PM10) y a 2.5 micras (PM2.5)

Clasificadas según su diámetro aerodinámico, las partículas en suspensión son toda partícula inhalable que pueden estar compuestas des de sulfatos, nitratos, carbonilla, polvo... Las partículas más grandes son principalmente emitidas por la erosión de los materiales, el polen,

minería, las carreteras, el sector agrícola y de la construcción. Mientras que las partículas más finas, comúnmente las PM2.5, son emitidas por la combustión de combustibles de diferentes orígenes (calefacciones, vehículos, industria, ...) o de fuentes secundarias debido a la reacción de dos gases.

Este contaminante se ha convertido en uno de los más debatidos y estudiados debido a sus efectos y riesgos a la salud humana. Las partículas en suspensión se introducen muy profundamente en los órganos respiratorios y en las vías sanguíneas. El simple contacto a corto plazo y a largo plazo provoca problemas cardiovasculares y respiratorios. En 2013, la Agencia Internacional para la Investigación contra el Cáncer (IARC), clasificó las partículas en suspensión como cancerígenas [19].

España tiene históricamente grandes niveles de partículas en suspensión debido a la presencia de intrusiones de polvo sahariano. En 2022 se registró ocho superaciones del Valor Límite Anual para el PM10 (25 µg/m³), principalmente en las Islas Canarias. No hay ninguna superación para de las PM2.5.[3]

Durante el verano de 2023, se han vivido diferentes episodios de contaminación por partículas en suspensión en toda Cataluña, provocados por la intrusión de masas de aire caliente africanas, además de la presencia de las emisiones por parte de los vehículos e industria. [20]



Figura 12 Contaminación de Barcelona (Mané Espinosa) [20]

3.3.5. Temperatura y humedad

Estos dos parámetros no solamente afectan directamente al ser humano en su día a día, sino que son también dos variables muy significativas en el funcionamiento de muchos sensores. En la figura 13 podemos observar como el sensor MEMS GM102B de Winsen para la detección de NO₂, tiene una dependencia con la temperatura y humedad relativa presente en el entorno de medición.

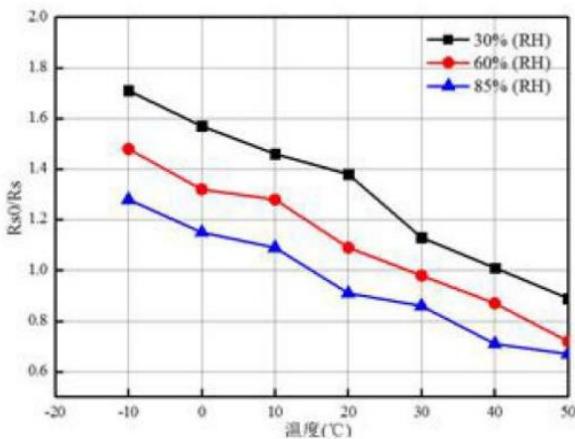


Figura 13 Efectos de la temperatura y la humedad relativa en el sensor GM-102B

Nuestro interés en estos dos parámetros ha radicado en la información que nos aporta sobre el estado del entorno y de la estación. Además, es intrínseco hablar de estos dos factores, y como afectan al día a día del ser humano y al medioambiente. Este mismo verano de 2023 hemos podido vivir uno de los veranos más calurosos y tal se ha registrado por la estación. Por otra parte, la humedad es uno de los parámetros que puede afectar al ser humano ya que facilita la propagación de virus, bacterias, componentes alergenos y el moho.[21]

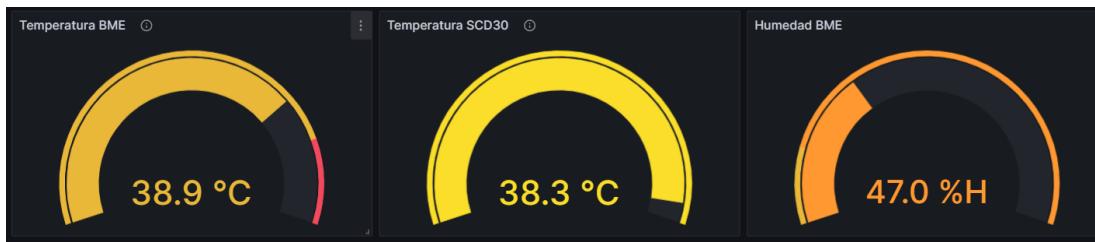


Figura 14 Temperaturas registradas 23/08/2023 en terraza.

3.4. Tecnología MEMS para detección de gases

Los sensores de detección de gas tipo MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems en inglés), son dispositivos de alto grado tecnológico que presentan un tamaño de dispositivo de milímetros o inferior. Estos dispositivos son capaces de detectar diversos gases presentes en el aire, gracias a reacciones electroquímica efectuadas en la superficie del electrodo. La detección se realiza al detectar una variación en la concentración del gas en el ambiente mediante el diferencial de potencial o de corriente experimentada en los electrodos. Estos electrodos suelen ser materiales preciosos (Platino u Oro) o de óxidos de metal semiconductores como el dióxido de estaño (SNO₂) o el dióxido de Wolframio. [22], [23]

Las aplicaciones principales de estos sensores se encuentran en acelerómetros, sensores de presión, sensores ópticos y en los últimos años en la detección de gases.

Las ventajas técnicas que presentan los detectores de gas con esta tecnología es el pequeño tamaño, portabilidad, sensibilidad más alta, poca consumición energética y unos tiempos de respuesta muy cortos.



Figura 15 Sensor MEMS al lado de una moneda

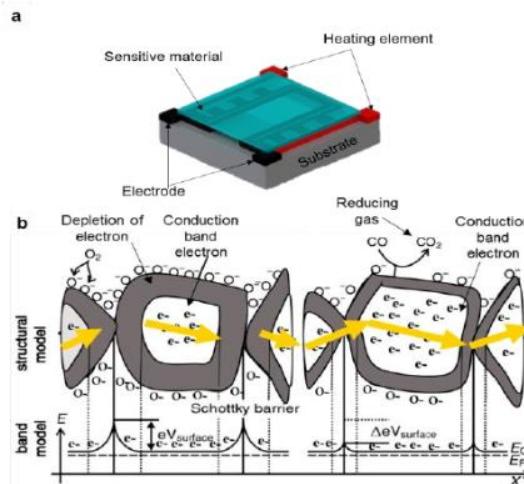


Figura 16 Esquema de diseño de un sensor de gas MEMS de tipo óxido metálico [23]

4. Estudio de viabilidad

4.1. Hardware

4.1.1. Olimex ESP32

La placa controladora de este trabajo ha sido la ESP32-EVB de la empresa búlgara Olimex®, basado en la arquitectura del ESP32 de Expressif como microcontrolador. La placa presenta integrada una serie de funcionalidades y de prestaciones que ofrecen al usuario una gran variedad de usos y aplicaciones. Las características más importantes que se destacan son el módulo Wifi, conexión Ethernet, conectividad CAN, lector microSD, relés integrados y Bluetooth LE.

La versión que se usa en este trabajo es la versión de uso comercial, la cual presta su utilización a temperaturas comerciales entre 0-70°C, no obstante, existe la versión ESP32-EVB-IND la cual presenta la capacidad y certificación para ser utilizado en entorno industrial (-40 a 85°C) además de incorporar una antena externa. Sin embargo, dada sus prestaciones, la placa obtenida es ideal para todo tipo de proyectos académicos y prototipaje industrial, el cual se encuentra en el abastecimiento de este Trabajo de Fin de Grado.

La placa ya ha sido probada y testeada en diferentes proyectos en el mundo del *IoT* como la monitorización de estaciones eléctricas [24] o el uso para el control de gases emitidos por alimentos en la industria alimentaria [25]

La placa presenta tres entradas de suministro de energía, siendo estas la entrada USB tipo-B, el puerto JST y el Jack de 5V. El puerto USB será el utilizado no solo para proporcionar energía a la placa, sino para poder operar con el Arduino IDE en el ordenador para cargar nuestro código. Además, el puerto JST sirve para implementar nuestro suministro autónomo a la estación mediante una batería de litio polimérica (LiPo) de 3.7V, con auto recarga mediante un panel solar fotovoltaico.

También cuenta con un módulo UEXT (*Universal EXTension-Connector*) [26] integrado en la placa para todo tipo de conexiones mediante 3 interfaces de conexión, siendo estas el SPI, I2C y el RS232. En nuestro trabajo, el módulo UEXT ha sido utilizado para la conexión de nuestra placa con una pantalla resistiva LCD, donde el usuario podrá observar el estado del monitoreo de la estación.

La ranura microSD, se ha configurado para poder soportar una tarjeta de 32GB donde se guardarán los datos de los sensores, tanto si se está conectado a la red como si no. Su uso nos proporciona una copia de seguridad de todos los datos obtenidos en caso de perder la conexión a Internet.

Gracias a la antena Wifi, todos los datos recogidos por los sensores serán transmitidos a la base de datos de InfluxDB, la cual nos servirá como software para realizar un procesamiento

de datos y enviar los datos a un panel de control creado para visualizar los datos para el usuario final, en tiempo real mediante el software de Grafana Cloud.

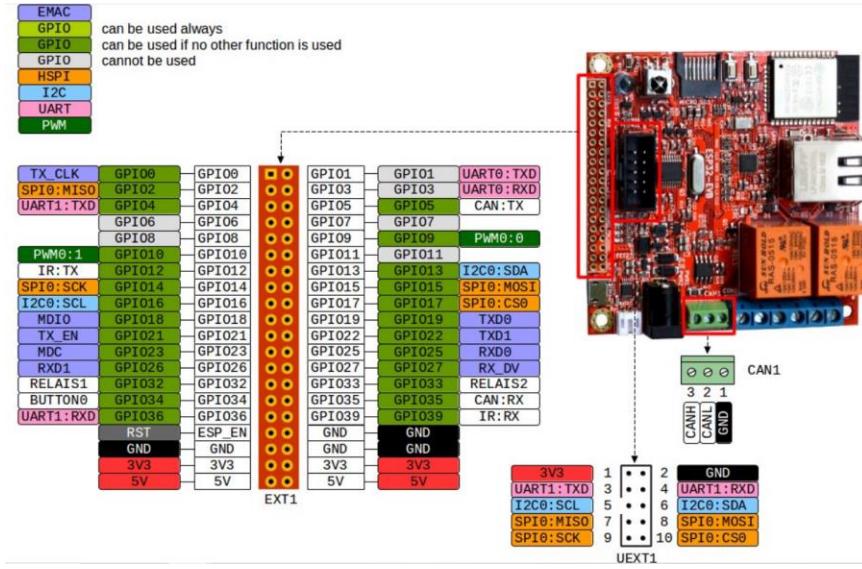


Figura 17 Pinout de la placa Olimex© ESP32-EVB-EA

4.1.1. Pantalla Olimex MOD-LCD2.8RTP

La interacción local del usuario con la estación de calidad del aire se realiza mediante una pantalla de tipo TFT-LCD (*Thin Film Transistor-Liquid Crystal Display*) de la misma compañía que el microcontrolador en uso (Olimex). Nuestro modelo de pantalla tiene como controlador el controlador ILI9341V de ILITEK, el cual permite el muestreo de 262,144 colores, operando a un voltaje de interfaz de 1.6-3.3V. La pantalla tiene una dimensión de 2.8" color con una resolución de 320x240 pixeles [27]. En ella se representarán los valores de la estación.

El módulo UEXT ya perfectamente integrado en la placa, podemos realizar la conexión a la pantalla mediante el conector UEXT, incluido con la pantalla. El protocolo de conexión entre ambos elementos será el SPI para la parte de pantalla LCD, mientras que el uso táctil utilizará el I2C.

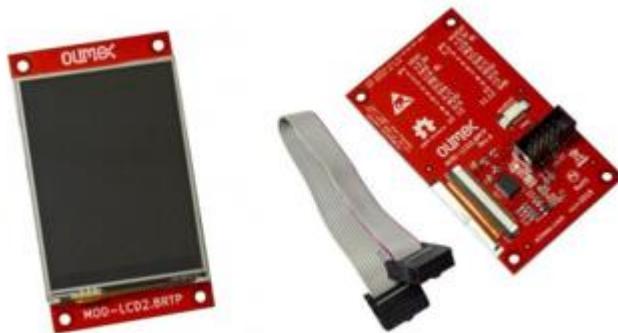


Figura 18 Pantalla Olimex

4.1.2. Ventilador Nidec

El ventilador Nidec F251R es un ventilador de pequeño tamaño y sin escobillas que permite una pequeña entrada de aire en la futura estación de sensores de medición, para crear una pequeña entrada forzada de aire a una velocidad constante y baja, que ayuda a la renovación de la carga y uniformidad en la entrada de aire ambiente.



Figura 19 Ventilador Nidec F251R

4.1.3. Sistema de alimentación secundaria y autonomía de la estación

Para dar un mayor grado de autonomía a la estación, se adquirió una placa fotovoltaica pequeña de 1.5W, la cual tiene la posibilidad de alimentar hasta 5V.

La batería de polímero de litio MLP805660 [28] de 3.7V y 3000 mAh. nos ofrece una solución económica. No obstante, debido a la tensión que puede alimentar, algunos sensores que requieren más voltaje no son posibles en esta configuración. Por lo tanto, en nuestro caso, el sensor SDS011, no estará operativo durante este modo de operación debido a su requerimiento de 5V de voltaje operativo.

Se adquirió el cargador de baterías LiPo bq24074 [29] de la marca Adafruit. Este dispositivo permite cargar baterías que tengan salida JST de 2 pines. La carga de baterías se puede realizar mediante la placa solar conectada al puerto JACK o conector un USB tipo C.

Tras diversos usos y con el paso del tiempo, se ha estimado que la batería puede suministrar alrededor de 5-7 horas de autonomía a pleno rendimiento.

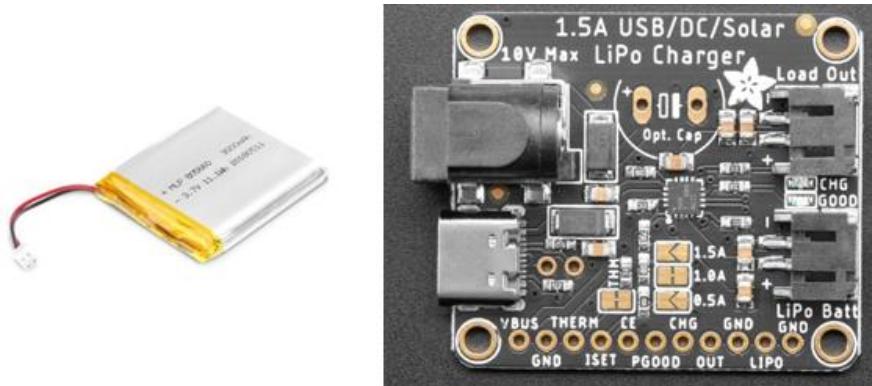


Figura 20 Batería Mikroe 3.7V LiPo y el módulo Adafruit bq24074

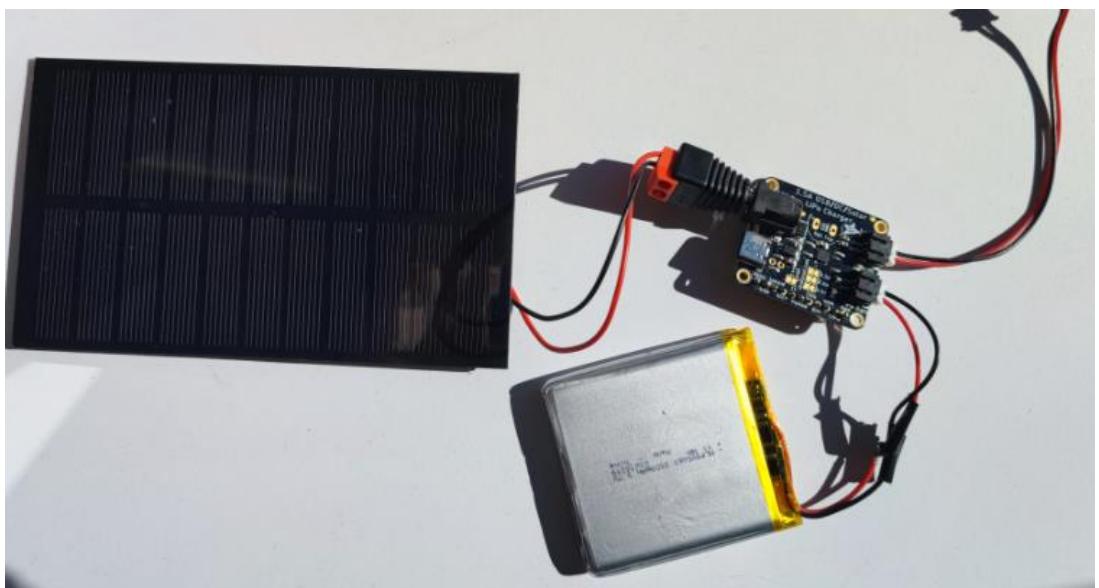


Figura 21 Fotografía del sistema de alimentación con la placa 1.5W, Adafruit bq02222 y la batería LiPo

4.2. Sensores

Se ha realizado un breve estudio de los diferentes modelos disponibles de sensores para la calidad del aire en el mercado compatibles con Arduino IDE. La viabilidad económica y técnica, disponibilidad e integración en nuestra tarjeta ESP32, han sido los factores clave para la elección de los sensores en caso de adquisición, y así, cumplir nuestros objetivos iniciales propuestos.

Se debe de destacar que previamente a la búsqueda de sensores se inició el proyecto con el sensor SEN0335 de la marca DFRobot, el cual integra en su PCB el sensor BME280 para la temperatura y humedad relativa, y el CSS811 para la determinación de CO2eq y COVT (Compuestos Orgánicos Volátiles Totales). Asimismo, también se tenía en posesión sensor SeeedStudio MEMS multicanal gas V2, que integra en su PCB, los 4 módulos MEMS que permiten la detección de una serie de gases como el NO2, TVOC, Etanol y el CO.

1.2.1. Sensores para la detección de temperatura y humedad relativa

Se requiere de sensores que puedan determinar estos dos parámetros, ya que son críticos en la evaluación de la calidad del aire debido a su influencia en la formación, dispersión y comportamiento de los contaminantes. Asimismo, afectan directamente al comportamiento de los sensores tanto en la exactitud como en la precisión de los datos.

Los sensores de temperatura y humedad relativa más relevantes en el mercado “*low-cost*” IoT son:

Tabla 1 Mercado de sensores de temperatura y humedad relativa

Sensor	Empresa	Precio €	Prestaciones principales
DHT11 [29]	AZDelivery	4.99	Temperatura: Rango: 0-50°C Resolución: 16-bit Precisión: 25°C ± 2°C Humedad Relativa: Rango: 20-80 % Resolución: 16-bit Precisión: ± 5% Protocolo serial de 1 hilo
SHT31 [30]	Sensirion	5.22	Temperatura: Rango: -40 – 125°C Precisión: 0-60°C ± 0.2°C 0-90°C ± 0.2°C Humedad Relativa: Rango: 0-100% Precisión: ± 2% Calibrado de fábrica.
DHT22 [31]	Aosong Electronics Co Ltd	5.6	Temperatura: Rango: -40 - 80°C Resolución: 16-bit Precisión: 25 ± 0.5°C Humedad Relativa: Rango: 0 - 100 % Resolución: 16-bit Precisión: ± 2% Protocolo serial de 1 hilo
BME280 [32]	AZDelivery	15.99	Temperatura: Rango: -40 - 85°C Resolución: 16-bit Precisión: 25 ± 0.5°C Humedad Relativa: Rango: 0 - 100 % Resolución: 16-bit Precisión: ± 3% Presión barométrica: Rango: 300 – 1100 hPa Protocolo I2C integrado

Los sensores DHT11 y DHT22 utilizan un termistor para la detección de la temperatura. Estos termistores se basan en un compuesto de material semiconductor el cual actúa como una resistencia donde la temperatura realiza cambios en ella. En estos sensores el termistor es de tipo NTC o de curva negativa.

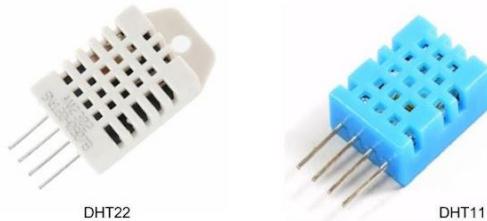


Figura 22 Sensores DHT11 y DHT22 [30]

En cambio, el BME280, emplea la tecnología MEMS de la compañía BOSCH, utilizada previamente en sus sensores BMP280 para la detección de la temperatura y presión. En definitiva, se puede señalar que el BME280 es el módulo BMP280 con el añadido del sensor de humedad [31].

Todos los chips previamente mencionados utilizan un sensor capacitivo para el cálculo de la humedad, este consiste en un material dieléctrico higroscópico colocado en el medio de un par de electrodos. Los cambios de voltaje resultantes cuando la mezcla de aire toca la superficie del material, provoca un cambio en la capacitancia del material, la cual es detectada por los electrodos. Una ventaja de este tipo de sensores es la mayor precisión frente a los sensores de tipo resistivo.

4.2.1.1. BME280

Nuestra elección viene dada por la ya obtención del BME280 al inicio del trabajo en el chip SEN0335 de la compañía DFRobot®. No obstante, podemos ver la Tabla 1 comparativa anterior, y observar que el BME280 nos ofrece unas ventajas sobre los demás sensores, además de su fácil integración en el entorno de Arduino y su gran versatilidad. Este sensor nos permite tener un amplio rango de temperaturas y de humedad relativa con una precisión muy buena, comparable a la de sensores de más alta gama. Además, gracias al sensor piezoelectrónico de presión integrado, añade la información con precisión los valores de la presión atmosférica, la cual nos servirá de información adicional para nuestra estación si se desea.

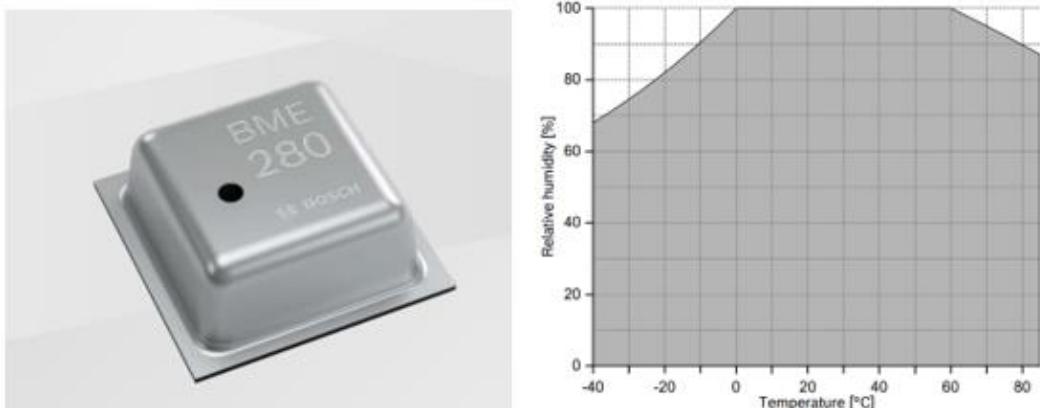


Figura 23 Chip BME280 y su gráfica de operación según temperatura

En la figura 23 podemos observar cómo desde 0-65°C el sensor nos ofrece una precisión en la humedad relativa para valores de 0-100 %HR según el fabricante. Para las condiciones en las que se ha utilizado el sensor, son idóneas ya que siempre se trabajará en el rango de 10-40°C.

4.2.1.2. SHT11

El módulo sensor SCD30 que próximamente se comentará en el apartado de sensores para la detección de CO₂, también integra un sensor de temperatura y humedad relativa en su PCB, el SHT31. Las prestaciones de este sensor se pueden observar en la tabla 1, las cuales nos ofrecen una gran precisión en su operativa.

Este sensor ha sido utilizado como apoyo a las mediciones del BME280, debido a que, a altas temperaturas, el SCD30 no se comporta adecuadamente como se observará en el apartado experimental. Sin embargo, el sensor sí que permite altas temperaturas de operación (hasta 125°C), pero su operativa a temperaturas a mayor de 50 grados y presencia alta de humedad, inhabilitan el envío de datos correctamente.



Figura 24 Chip del sensor SHT31

4.2.2. Sensores de medición de CO₂

Los sensores de CO₂ más importantes en el mercado son:

Tabla 2 Sensores de CO₂ compatibles con Arduino IDE

Sensor	Empresa	Precio €	Prestaciones principales
MQ135 [32]	Hanwei	7.99	Voltaje Operativo: 5 V Rango: 0-1000 ppm Precisión: 10-200 ppm Material sensor: SnO ₂ Sensible a múltiples gases Salida Analógica No calibrado Tiempo de precalentamiento: 24 horas
SCD30 [33]	Sensirion	54.99	Voltaje Operativo: 3.3- 5.5 V Rango: 0-40000 ppm Precisión: 400-10000 ppm Temperatura de estabilidad: 0-50°C Protocolo I2C Integrado Tecnología NDIR Calibrado de fábrica Incluye el sensor SHT31 (Temperatura + %HR)
SCD41 [34]	DFRobot	59.99	Voltaje Operativo: 3.3- 5V Rango: 0-40000 ppm Precisión: 400-5000 ppm Salida: I2C Integrado Tecnología NDIR + Calibrado de fábrica
SEN0159 [35]	DFRobot	49.99	Voltaje Operativo: 3.7- 5V Rango: 0-40000 ppm Precisión: 400-10000 ppm Protocolo I2C Integrado Tecnología NDIR + Calibrado de fábrica

El MQ135, de la familia de sensores MQ, es la solución más barata del mercado y sería la opción directa, no obstante, se ha observado en múltiples informes y estudios que la implementación es demasiado costosa y pobre [36], además que la calibración de estos es prácticamente imposible de realizar sin equipos específicos y las condiciones de laboratorio más optimas y específicas [37], [38]. Este sensor fue adquirido personalmente, y se intentó

sin éxito calibrar. Es un sensor que, debido a su fabricación, tiene una sensibilidad a una gran variedad de gases presentes en el entorno, lo cual lleva a resultados erróneos [39]. Hay que añadir, que no hay una librería de Arduino correctamente preparada para este sensor.

Debido a las razones anteriormente expuestas, se acordó la compra de un sensor de CO₂ más preciso y viable técnicamente. Se decidió por la compra del sensor SCD30, el cual estaría disponible para su envío y entrega en poco tiempo, además de unas prestaciones excepcionales. Este sensor ha sido el más costoso de todos los adquiridos en el trabajo.

4.2.2.1 Sensirion SCD30

El módulo SCD30 presenta una PCB que integra el detector NDIR para el CO₂ y el chip SHT31. La mayoría de los sensores comerciales para la detección de CO₂ utilizan la tecnología NDIR (No dispersive Infra-Red) o detección infrarroja no dispersiva. El principio fundamental del NDIR es observar la absorción de la radiación infrarroja de las moléculas de CO₂ de ciertas longitudes de onda. Como se observa en la Figura 25, el CO₂ presenta una mayor absorción a la longitud de onda de 4.3 μm .

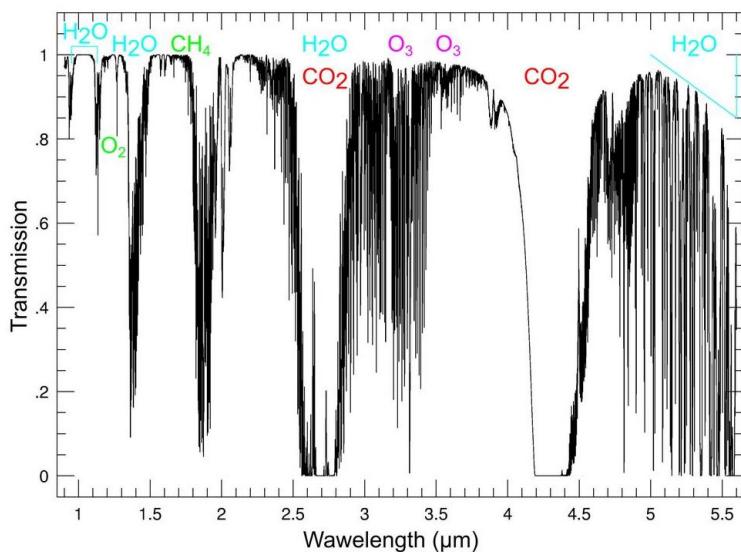


Figura 25 Longitudes de onda Infrarojas [40]

La fuente de radiación infrarroja es producida por una bombilla colocada en un extremo del sensor (ver Figuras 26 y 27). La radiación es detectada por dos filtros ópticos CMOSens® colocados en el extremo opuesto. El primer sensor es un filtro paso banda que detecta la longitud de 4.3 μm que mide la intensidad de radiación (I_r). El segundo detector o canal de referencia tiene un filtro paso banda que mide la intensidad de radiación (I_0) correspondiente a la longitud de onda de 4 μm .

Mediante la ecuación de la Ley de Beer-Lambert:

$$\frac{I_R}{I_D} = e^{KCL}; \text{ donde:}$$

$C = \text{concentración de CO}_2$

$K = \text{coeficiente de absorción del CO}_2$

$L = \text{distancia entre la fuente de radiación y el detector}$

Cuando se produce una variación en la intensidad, ambas I_R e I_D varían idénticamente, como resultado la fracción de estas se mantiene constante, permitiendo conocer la concentración del CO₂ en todo momento.

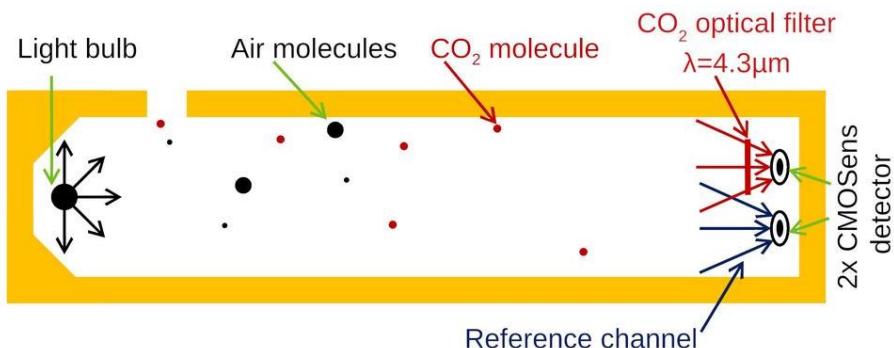


Figura 26 Esquema general de un sensor NDIR [41]

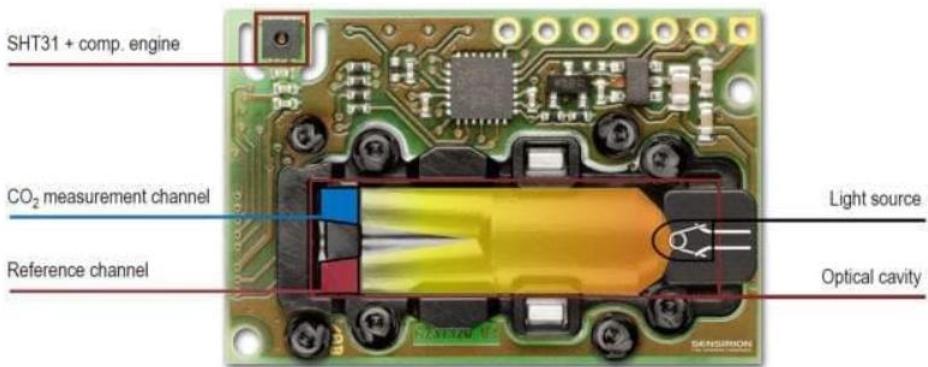


Figura 27 Esquema del módulo SCD30

Esta tecnología es mucho más precisa que los detectores por capa sensible de SnO₂. Asimismo, los sensores NDIR son mucho más estables y selectivos al gas medido, presentan una mayor vida útil y tienen una alta resistencia a la humedad, el polvo y suciedad.

El módulo de detección de CO₂ de este sensor, está preparado para detectar con precisión un rango de partes por millón de CO₂ de 400-10000 ppm. Su uso aplicación principal es el uso dentro de interiores, sin embargo, la integración en exteriores es plausible y efectiva.

4.2.3. Sensores de partículas en suspensión

Los sensores de partículas en suspensión del mercado analizados son:

Tabla 3 Sensores de partículas en suspensión para Arduino IDE

Sensor	Empresa	Precio €	Prestaciones principales
SDS011	Nova Fitness [42]	33.99	Voltaje Operativo: 5 V Detección PM2.5 y PM10 Rango 0-1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Resolución mín. de partícula: 0.3 μm Protocolo UART Integrado Tecnología: Dispersión láser Calibrado de fábrica
SEN0460	DFRobot [43]	39.99	Voltaje Operativo: 3.3-5 V Detección PM1.0, PM2.5 y PM10 Rango 0-1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Resolución de partícula: 1 $\mu\text{m}/\text{m}^3$ Protocolo I2C Integrado Tecnología: Dispersión láser Calibrado de fábrica

La elección del SDS011 ha sido dada por la corta disponibilidad de entrega y un precio más económico. Aunque el sensor de DFRobot nos permite utilizar el I2C como método de comunicación entre la tarjeta y él, la entrega del sensor podía tardar meses debido a su única disponibilidad se encontraba en el continente asiático. No obstante, si miramos las características técnicas, observamos que el sensor tiene muy buenas prestaciones, además que existen ya informes que demuestran muy buenos resultados con este sensor, obteniendo precisiones de $R^2=0.96$ y $R^2=0.91$ en pruebas controladas en laboratorio [44], [45].

4.2.3.1. PM Nova Sensor SDS011

El sensor SDS011 presenta una alta fiabilidad y precisión con un rango de partículas desde 0-1000 $\mu\text{m}/\text{m}^3$. La tecnología de detección que utiliza el sensor se basa en la dispersión de luz mediante láser. Las partículas entran por la boca de entrada y atraviesan el láser del sensor. Tras ello, las partículas dispersan el haz del láser en diferentes direcciones formando diferentes ángulos. Los detectores de luz están ya colocados en los estos ángulos específicos y realizan una señal eléctrica que variará según la luz procesada. Las señales eléctricas serán amplificadas y procesadas por el sensor. Con esta información se podrá

obtener el diámetro de la partícula gracias al ángulo de dispersión y las ondas generadas por la señal eléctrica [46]. Finalmente, otro ventilador integrado en el interior expulsará las partículas ya analizadas hacia el exterior. En la Figura 28 se puede observar en un esquema interno el funcionamiento de este sensor.

Para la integración en nuestro sistema, este sensor necesita una alimentación de 5V, por lo tanto, siempre será utilizado con un ordenador o equipo que pueda suministrar ese voltaje de operación. En el caso de querer utilizar el sistema autónomo proporcionado por la batería de LiPo adquirida, no podemos utilizar este sensor correctamente, ya que sólo podremos aportar un máximo de 3.3V de tensión de alimentación. El SDS011 utiliza el protocolo de comunicación del tipo UART.

Las librerías existentes en Arduino son bastante limitadas y muchas están pensadas para una arquitectura de microcontrolador ESP8266, sin embargo, se ha integrado perfectamente para el uso nuestra placa ESP32.

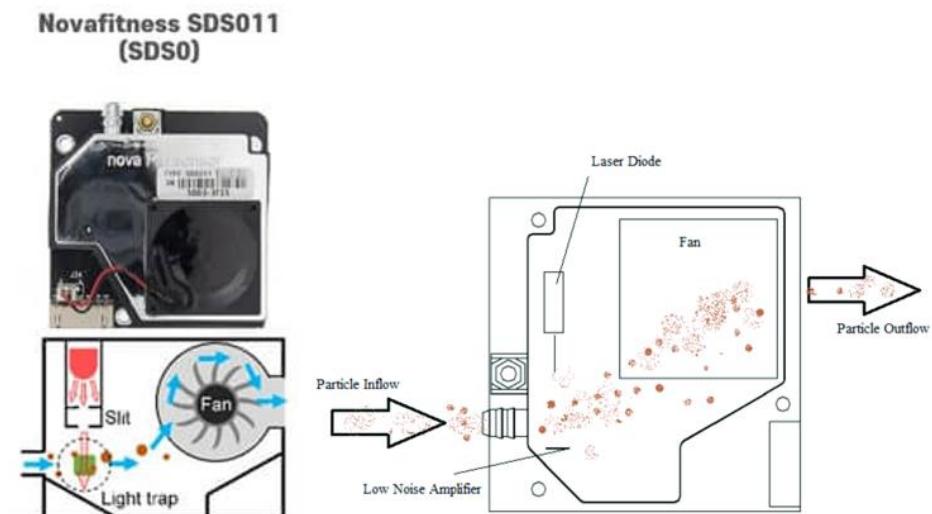


Figura 28 Esquema de funcionamiento del PM sensor SDS011 [47]

Este sensor debe ser colocado tal como se indica en la Figura 29, y es por ello por lo que las mediciones se realicen de tal forma para evitar errores.

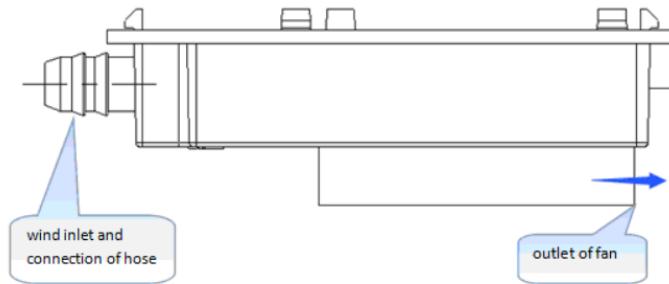


Figura 29 Posición correcta para el funcionamiento del sensor de partículas [42]

4.2.4. Sensores de CO y NO₂

Los sensores de CO y NO₂ utilizados para la detección de Arduino, suelen estar formados por módulos de tipo MEMS o de la familia MQ que tiene sensibilidad a diferentes gases y entre ellos se encuentran el monóxido de carbono y el dióxido de nitrógeno. Un ejemplo es el SGXSensortech MICS-6814 [48] , que en la Figura 30, podemos observar algunas características de este sensor. El sensor SeeedStudio Multichannel gas sensor v2 utiliza la misma tecnología que el MICS-6814, con la diferencia que tiene cuatro sensores separados: el gm-102b, el GM-302, el GM-502 y el GM-702 que permiten detectar dióxido de nitrógeno, etanol, componentes orgánicos volátiles y monóxido de carbono respectivamente. Teniendo así un módulo PCB con 4 chips integrados para un gas en concreto, como se observa en la Figura 31.

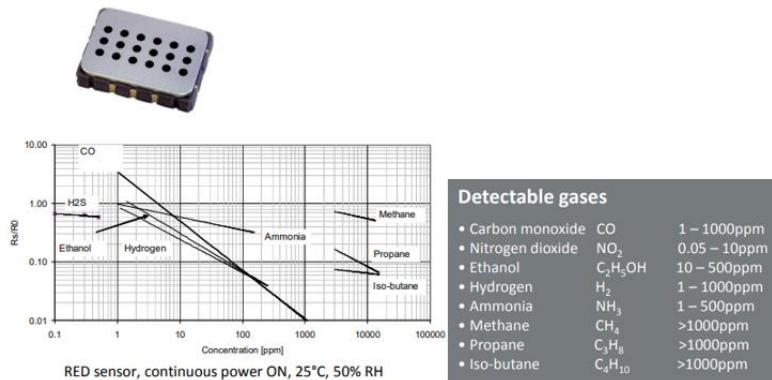


Figura 30 Especificaciones del MICS-6874 [48]



Figura 31 Sensor Multichannel Gas Sensor y esquema de chips GM-MEMS[49]

Si se requiere un detector específico para uno de estos gases, se tiene que observar los sensores electroquímicos Alphasense o Honeywell [50], [51]. Estos sensores son de gama alta, muchos de estos con precios superiores a 100 euros y no están adaptados al uso con tarjetas Arduino o similares. Estos sensores son están comercializados en dispositivos previamente calibrados y preparados para el usuario o empresa. Además, el uso de estos es principalmente en industrias y entornos muy especializados. Por lo tanto, este tipo de sensores se encuentra fuera del rango de alcance de nuestro trabajo.

4.2.4.1. SeeedStudio Multichannel Gas sensor v2

El SeeedStudio Multichannel V2 [49] adquirido al inicio del trabajo es la solución económica y escogida. De los 4 chips MEMS integrados, se han utilizado el GM-102b para la detección de NO₂ y el GM702B para el CO.

Las características de estos sensores son:

Sensor	Empresa	Prestaciones principales
GM-102B [52]	Winsen	Voltaje Operativo: 3.3 - 5V Gas detectado: NO ₂ Rango: 0.1-10 ppm Protocolo I2C Integrado Tecnología MEMS
GM-702B [53]	Winsen	Voltaje Operativo: 3.3 - 5V Gas detectado: CO Rango: 5-5000 ppm Protocolo I2C Integrado Tecnología MEMS

No obstante, y como se comentará más adelante en la parte experimental, este sensor

presenta una gran dificultad para implementarse debido a la falta de información, librería de código muy limitada y una calibración de fabrica deficiente y poco detallada como ya han comentado varios usuarios en los foros del fabricante y de Arduino [54], [55].

4.3. Protocolos de comunicación

La comunicación entre los sensores y dispositivos a la placa microcontroladora es fundamental para que el conjunto funcione correctamente.

A continuación, se detallan brevemente los protocolos principales utilizados:

4.3.1. Serial Peripheral Interface

Protocolo de comunicación síncrono que permite la comunicación serial entre el maestro y el esclavo[56], que requiere 4 cables de conexión (SCLK, MOSI, MISO, SS). Las aplicaciones más frecuentes dada sus prestaciones se encuentran en todo tipo de pantallas, cámaras, sensores y memorias SD. [57]

Las líneas presentes son:

- SCLK o *Serial clock*: Encargado de mantener la sincronicidad de la comunicación y es dirigido desde el maestro.
- MOSI o *Master Output, Slave Input*: Línea de transferencia de instrucciones e información del master al esclavo.
- MISO o *Master Input, Slave Output*: Línea de transferencia de instrucciones e información del esclavo al maestro.
- SS o *Slave Select*: Línea que se conecta a un esclavo o a un conjunto de esclavos que permite a los dispositivos esclavos, ver y responder a las directrices del maestro.

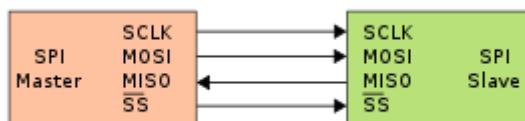


Figura 32 Diagrama de esquema de funcionamiento del SPI

Este protocolo es el utilizado por la pantalla LCD y la tarjeta microSD. [58]

4.3.2. I2C – Inter-Integrated Circuit

Protocolo síncrono más utilizado para la conexión de múltiples dispositivos al maestro. El envío de información se inicia cuando el maestro requiere la información al esclavo correspondiente mediante una dirección asignada[57].

El bus I2C consiste en dos líneas:

- SCL o Serial Clock: Reloj que mantiene la sincronicidad de la comunicación entre los dispositivos.
- SDA o Serial Data: Mover el flujo de los datos entre dispositivos.

Los sensores DFRobot SEN0335, SeeedStudio Multichannel V2 y el Sensirion SCD30 integrados en la estación de calidad de aire, utilizan este protocolo de comunicación. Los pines de la placa para el protocolo I2C se encuentran en el GPIO16 (SCL) y GPIO13 (SDA).

4.3.3. UART – Universal Asynchronous Receiver/Transmitter

Protocolo de comunicación asíncrono también llamado comunicación serial.

El método de comunicación entre los dos dispositivos se utiliza mediante las señales RX y TX, siendo la señal de recepción y transmisión respectivamente.

En la estación, el receptor será la placa de desarrollo Olimex, mientras que el emisor será el sensor de partículas SDS011. Asimismo, este tipo de comunicación es el utilizado a través del cable micro USB tipo B para cargar el código desde el Arduino IDE en el ordenador a la placa.

Este protocolo tiene como desventaja que la cantidad de datos enviada es baja, siendo solo 8 bits, más los dos bits de START y STOP. Estos bits de START y STOP, son los que dan inicio y final al envío de la información.

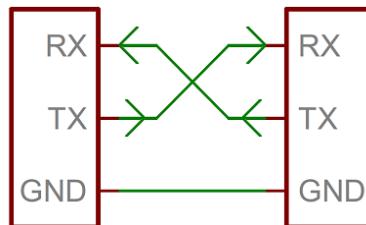


Figura 33 Topología de la conexión UART [59]

El sensor Nova Sensor PM sds011 para la detección de partículas en suspensión utiliza este protocolo de comunicación. Para la placa Olimex ESP32-EVB tiene disponible un par de pines disponibles para la conexión serial UART; los GPIO04 (TX) y el GPIO36 (RX).

En la Figura 34 se ha representado los protocolos empleados en el conjunto de la estación de calidad del aire:

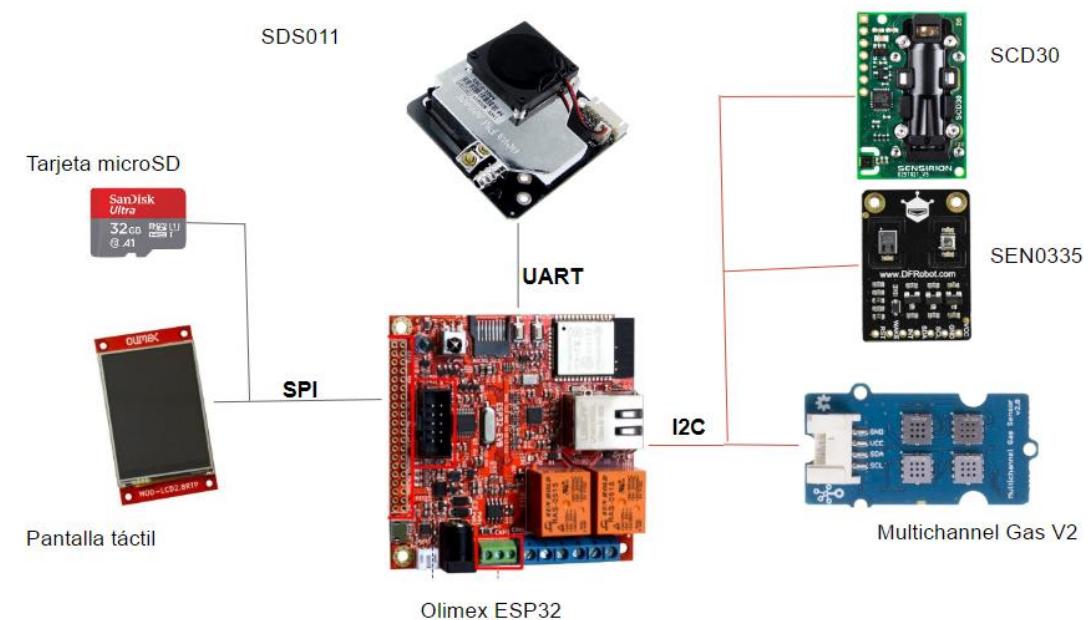


Figura 34 Esquema de conexiones de la estación

4.4. Software de código - Arduino IDE

Arduino la plataforma de código abierto electrónica basada en hardware y software, de uso sencillo. [60]



Figura 35 Logo de la empresa Arduino

Arduino IDE es un entorno de desarrollo integrado, tal como indican las siglas IDE (*Integrated Design Environment*), es decir, un software informático implementado para poder desarrollar código eficientemente por parte del usuario. Este software se encuentra disponible como una aplicación de escritorio para múltiples plataformas (Windows, Linux, iOS...). Arduino IDE nos ofrece un editor de código, juntamente con su depurador y compilación.

Una de las grandes ventajas de esta plataforma es la facilidad de uso y la gran comunidad en línea presente. Con el auge del IoT y los proyectos DIY, esta aplicación ha sido la base para entusiastas y profesionales que han entrado en el mundo con el objetivo de crear, diseñar diferentes sistemas para un amplio abanico de aplicaciones, desde un sistema simple

de LEDs, juegos, sensores de movimiento a drones y sistemas complejos de detección de gases contaminantes.

La plataforma nos permite implementar no solo trabajar con las placas de la misma compañía sino, que tiene implementadas la gran mayoría de tarjetas del mercado, desde las tarjetas de ESP8266, los ESP32 hasta los módulos Raspberry Pi.

La aplicación cuenta con un administrador de bibliotecas, las cuales permiten al usuario descargar aquellas que sean precisas para su trabajo, asimismo es posible crear una biblioteca para tu sensor o programa para obtener el objetivo deseado.

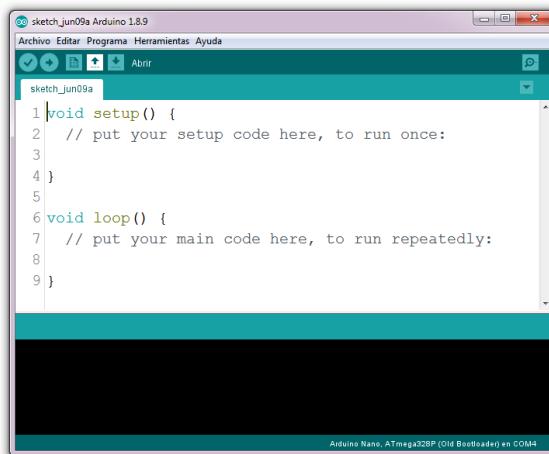


Figura 36 Arduino IDE

Para nuestro trabajo se ha realizado en el entorno del Arduino IDE versión 1.8.15. En la realización de este trabajo, el software se encuentra en la versión 2.1.1. No obstante, no se ha actualizado a la nueva versión debido a que las nuevas versiones (a partir de la 2.1.0 [61]) aun no disponen de prestaciones y/o características presentes en las versiones anteriores, como la posibilidad de utilizar el ESP32 Sketch Data Upload, que permite trabajar con la memoria *flash SPIFFS* del ESP32 y la tarjeta microSD[62] .

4.5. Plataformas y aplicaciones de toma de datos y visualización en la nube

Siguiendo con los objetivos propuestos, se ha explorado una serie de programas y plataformas en la nube que nos permitan gestionar, monitorizar y/o visualizar nuestros datos extraídos por el sistema de sensorización. Las plataformas más utilizadas por la comunidad IoT son Arduino Cloud, Thingspeak, Firebase, NodeMCU, HiveMQ, InfluxDB, Grafana.

La creación del data-logger con un gran enfoque en el low-cost y la sencillez de uso, es por eso por lo que se ha buscado que las plataformas ofrezcan una interacción usuario-plataforma más directa, sencilla y económica. Más todavía, las plataformas para el data-

logger deben tener la posibilidad de trabajar juntamente con el IDE de Arduino y nuestro microprocesador ESP32.

Tras ser evaluadas y probadas, finalmente se ha seleccionado InfluxDB y Grafana, como la solución más apropiada para nuestro fin y alcance. InfluxDB actúa como el software para recibir, almacenar y procesar los datos, mientras que Grafana realizará las visualizaciones en paneles de control y visor de las alertas. Estos dos softwares están muy preparados para trabajar de manera conjunta, teniendo grandes fuentes de documentación en línea para poder interactuar entre ellas, todo pese a ser productos desarrollados por diferentes compañías. [63], [64]

También se comentará en los últimos apartados de esta sección, un breve vistazo a ThingSpeak y Firebase, como plataformas probadas y con gran potencial para su uso, todo y no ser las escogidas.

4.5.1. InfluxDB Cloud

La plataforma InfluxDB es una plataforma base de datos de serie temporales que permite el almacenaje y análisis de grandes flujos de datos e información a tiempo real. En este trabajo utilizaremos su plataforma en la nube denominada InfluxDB Cloud 2, la cual permite realizar las operaciones en los servidores InfluxDB, y, por lo tanto, el usuario no debe de encargarse del mantenimiento, infraestructura o seguridad del servidor. Únicamente deberemos de escoger donde se alojarán nuestros datos según los proveedores disponibles y nuestra región. Las opciones son los servidores de Amazon (Amazon Web Services), Microsoft (Azure) o de Google (Google Cloud). El servidor escogido fue el proporcionado por Amazon Frankfurt (Alemania).

Nuestra función con InfluxDB es ser un espacio donde se envíen los datos recogidos y se almacenen en la red. Este programa será la base de nuestros datos, siendo el principal gestor de datos. En el caso que fallara la conexión con el ESP32, la tarjeta microSD sería la copia de seguridad de datos. Una de las funciones más interesantes de la plataforma InfluxDB, es la posibilidad de subir archivos a la nube, en formato .csv, el cual el programa procesará y guardará los datos.

Para este trabajo se ha utilizado el plan gratuito de la plataforma InfluxDB Cloud, el cual nos proporciona una serie de prestaciones que son suficientes para nuestro proyecto. Si se requiere escalar el proyecto o aumentar la retención de datos, se podría mejorar el plan a otro con mejores características, no obstante, para el alcance y uso de este trabajo, no se ha considerado necesario.

Your Free Plan			
Max Dashboards	5	Max Tasks	5
Max Checks	2	Max Notifications	2
Max Buckets	2	Reads	300 MB / 5 min
Max Retention Seconds	30 days	Writes	5 MB / 5 min
Get free \$250 credit Credit applied to first 30 days of usage		<ul style="list-style-type: none"> Unlimited buckets to store your data Unlimited storage retention Unlimited dashboards <ul style="list-style-type: none"> Unlimited tasks Unlimited alert checks and notification rules HTTP and PagerDuty notifications 	
UPGRADE NOW			

Figura 37 Características generales del plan gratuito de InfluxDB Cloud

Tras el inicio de sesión en la aplicación, deberemos de seleccionar la procedencia de nuestros datos. InfluxDB ya tiene previsto una serie de aplicaciones, con las librerías dedicadas según la procedencia. En nuestro caso, tal como se puede observar en la Figura 36, escogeremos la aplicación de Arduino.

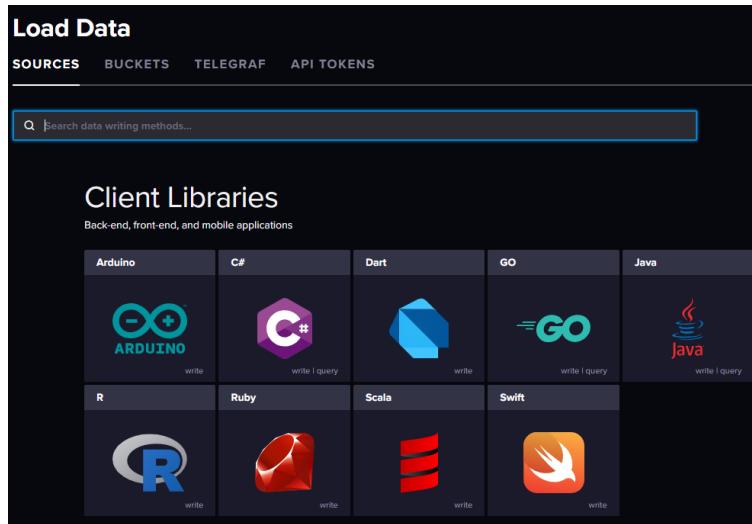


Figura 38 Librerías disponibles para la subida de datos a InfluxDB

Es necesario la instalación de la biblioteca ESP8266_InfluxDB ver 3.13.1 [65], que permite la interacción entre el InfluxDB Cloud y el Arduino IDE.

El siguiente paso es la creación del *bucket*, el cual como la traducción literal indica, un *bucket* es un cubo o repositorio que recibe el espacio donde se guardarán nuestras series de datos temporales que iremos registrando de todos los sensores.

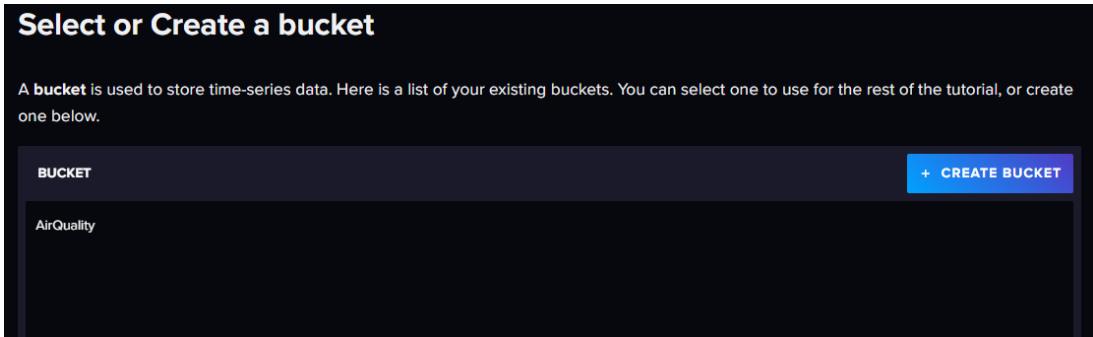


Figura 39 Creación del bucket

A continuación, el cliente de InfluxDB generará automáticamente el API Token único, el cual es la llave o mecanismo que permite el acceso a los datos.

Al final de la configuración deberíamos de tener guardado los 4 elementos que serán necesarios incluir en nuestro código: URL, API Token, número de organización y el Bucket. En la Figura 40 se muestra en Arduino IDE, el trozo de código correspondiente a la configuración necesaria de InfluxDB.

```
#define INFLUXDB_URL "https://eu-central-1-1.aws.cloud2.influxdata.com"  
#define INFLUXDB_TOKEN "AKOZ[REDACTED]dWZWfA=="  
#define INFLUXDB_ORG "724[REDACTED]8"  
#define INFLUXDB_BUCKET "AirQuality"
```

Figura 40 Código Arduino con las direcciones necesarias para el envío de datos a InfluxDB

Tras configurar la realización de la carga de datos al servidor, en el Data Explorer de InfluxDB, se nos ofrece múltiples opciones de análisis de los datos recogidos y visualización. Una de las opciones presentadas es la posibilidad de descargar el documento .csv de los datos recopilados, por si se quisiese tratar los datos localmente.

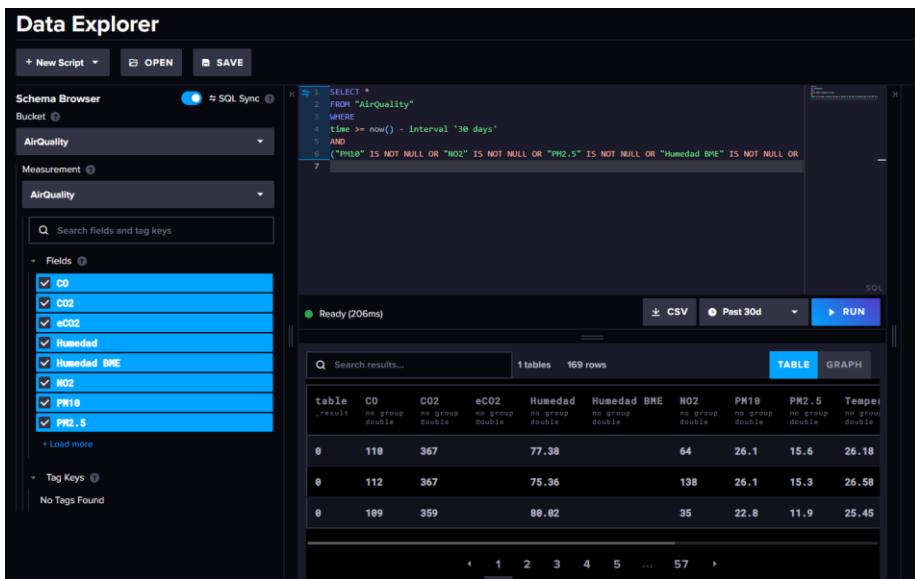


Figura 41 Explorador de datos del software InfluxDB

Otra función del software es la visualización de datos en grafica. No obstante, se utilizará el software de Grafana en formato panel de control, el cual es más intuitivo y nítido para el usuario final.

4.5.2. Grafana Cloud

Grafana Cloud es el aplicativo en la nube que se alimentará de los datos subido al InfluxDB para crear los paneles de control deseados. Este software de Grafana Labs, es uno de los programas más utilizados en el mundo para la creación de paneles de control, dada su sencillez de uso y la gran cantidad de software y lenguaje de programación que soporta.



Figura 42 Grafana Cloud

Para el transcurso de nuestro trabajo se ha utilizado la versión gratuita que nos permite la creación de 5 paneles de control y un flujo de datos bastante generosa de 50 GB/mes.

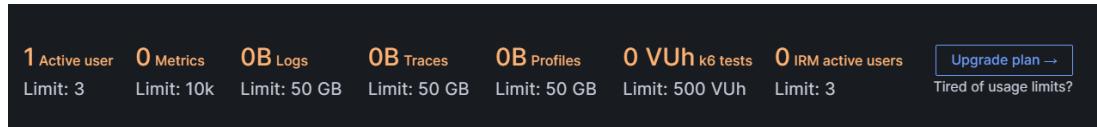


Figura 43 Características del plan gratuito de Grafana Cloud

En versiones premium y superiores, se podría realizar más envíos de datos y poder publicar públicamente nuestros paneles, no obstante, para el alcance de aplicación y rango de datos necesarios para nuestro trabajo no se ha visto necesario.

Tras el registro en la plataforma, procede a conectar los datos de InfluxDB con la plataforma de Grafana. Para ello, se necesitará crear el acceso Api Token en el InfluxDB que permita el acceso y recogida de los datos en InfluxDB por parte de Grafana Cloud.

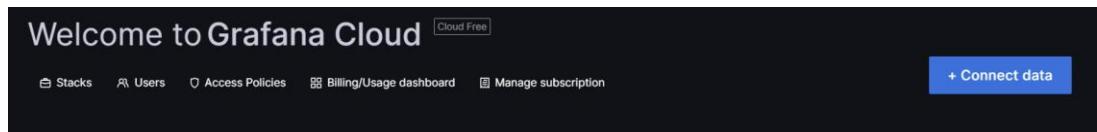


Figura 44 Inicio de configuración de Grafana Cloud

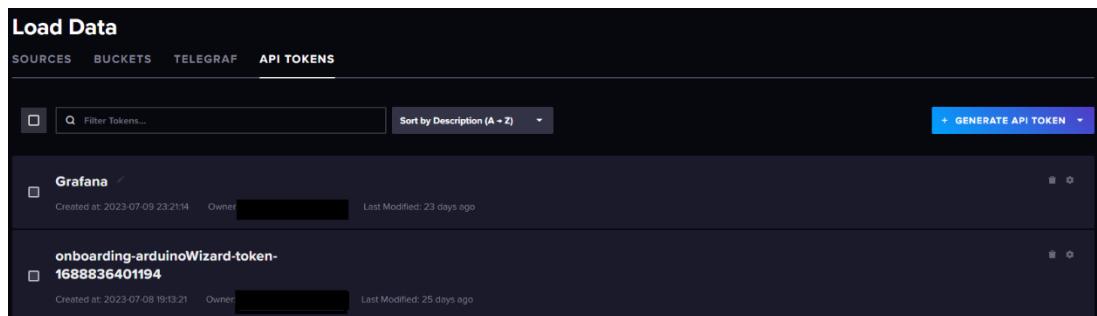


Figura 45 Creación del API Token en InfluxDB para el uso de Grafana

En el apartado de fuentes de datos, deberemos de seleccionar la opción de InfluxDB. Seguidamente se procederá a introducir los detalles de configuración necesarios para el intercambio de información entre los dos softwares.

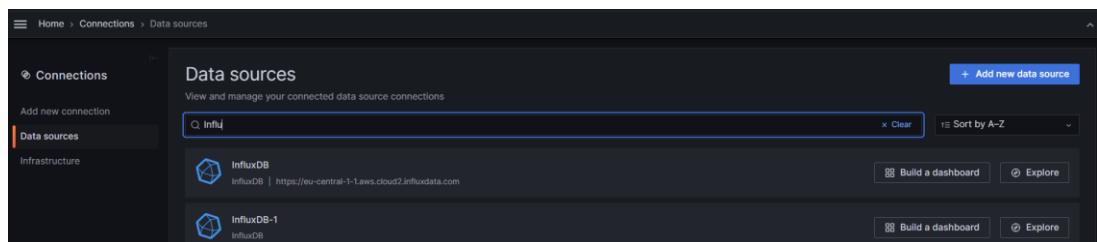


Figura 46 Cargar datos desde InfluxDB

Basic Auth Details		
User	javier	.com
Password	configured	<button>Reset</button>

Custom HTTP Headers		
<button>+ Add header</button>		

InfluxDB Details		
Organization	javiere.com	
Token	configured	
Default Bucket	AirQuality	
Min time interval	60s	<small>ctrl+k</small>
Max series	1000	<small>ctrl+k</small>

Figura 47 Configuración para el acceso de datos de InfluxDB

Finalmente se procede a la creación de la visualización de datos de los sensores en formato panel de control, el cual puede ser configurado según los requisitos del usuario. En las Figuras 48,49,50, se observa la interacción para la creación de estos paneles.

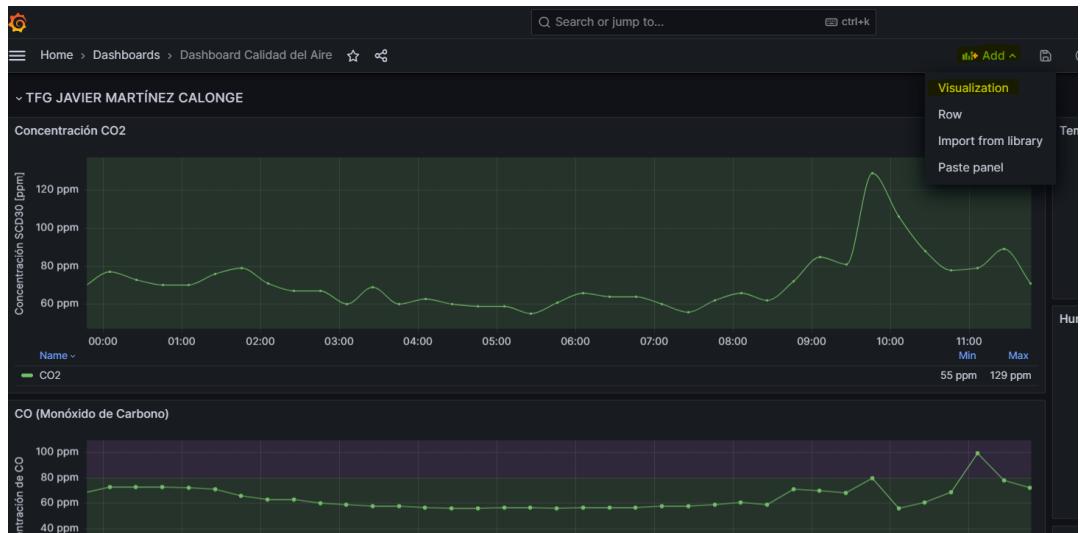


Figura 48 Creación de visualizaciones

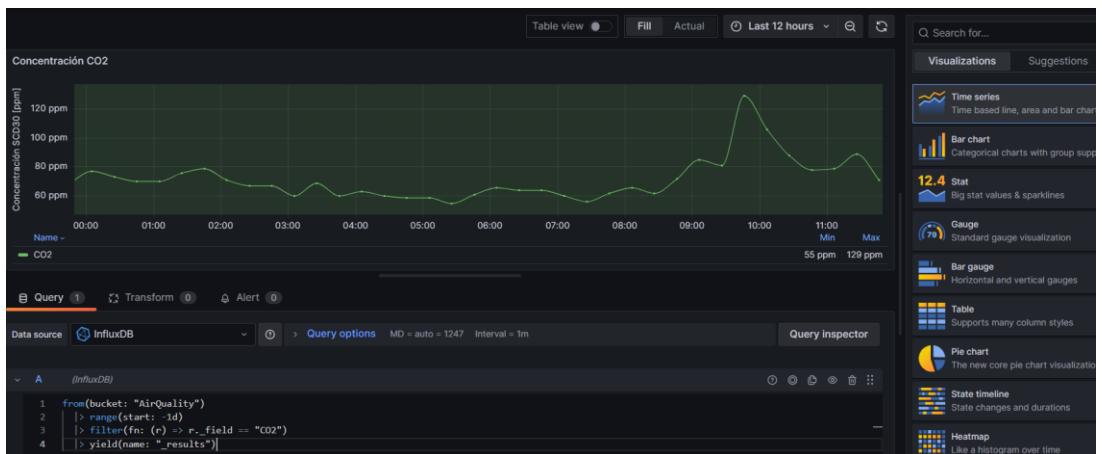


Figura 49 Opciones de visualización



Figura 50 Visualización en Grafana

4.6. Código

El código principal de Arduino IDE utilizado para la estación de calidad de aire se encuentra en el repositorio web Github para este trabajo: [TFG-Estación de Calidad de Aire-JavierMC](#). En él se encuentra comentado y explicada la función que realizan cada línea o conjunto de líneas de código, según su propósito.

La implementación de este ha sido una de las partes troncales de este trabajo asimismo como uno de los procesos más duraderos y costosos.

1.6.1. Sistema integrado

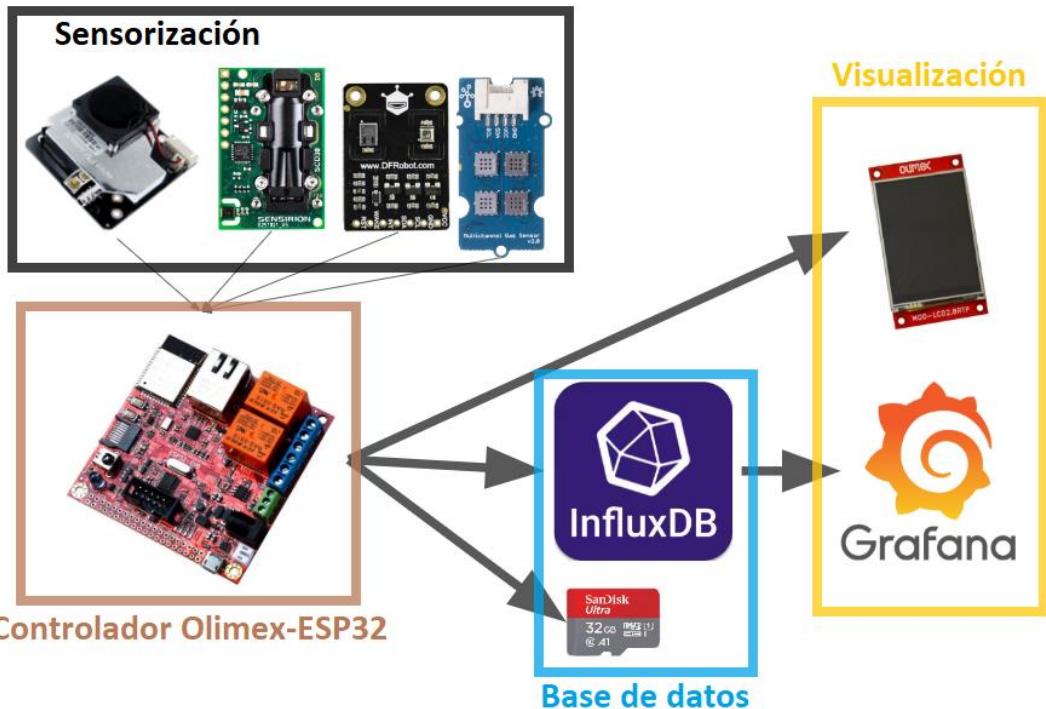


Figura 51 Sistema integrado de la estación de calidad del aire

4.7 Otros softwares

4.7.1. MathWorks ThingSpeak

La plataforma ThingSpeak es la solución de MathWorks para el mundo del IoT. Este servicio permite el recolección, análisis y visualización de los datos que se envíen desde los sensores a tiempo real. Es gratuita para un uso no comercial académico, limitando el uso de algunas funcionalidades. Permite el análisis de los datos con Simulink y Matlab, programas con un gran poder de computación numérica. Sin embargo, observando las prestaciones que nos ofrece InfluxDB y su integración con el software de Grafana, la plataforma de MathWorks se queda bastante por atrás para nuestro objetivo.

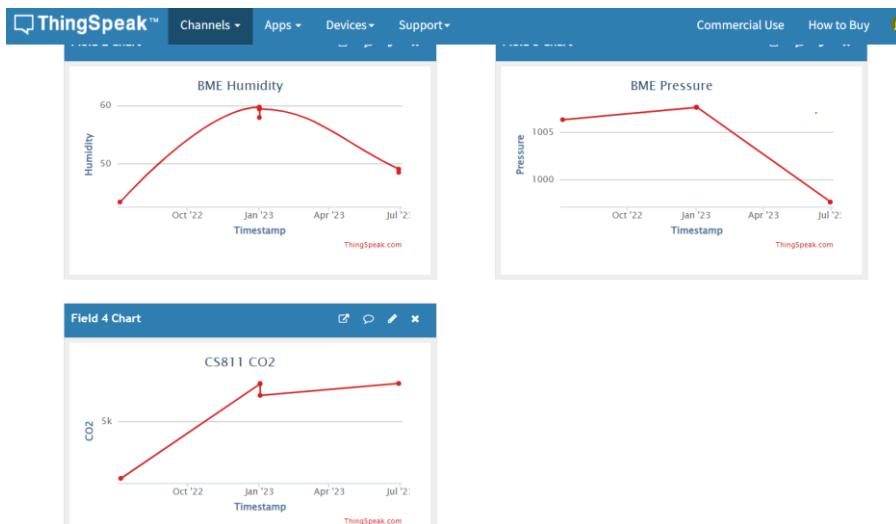


Figura 52 Visor de datos de ThingSpeak

El código utilizado se encuentra en el repositorio de [Github](#).

4.7.2. Google Firebase

Firebase es la plataforma de Google para la creación y desarrollo de aplicaciones móviles y web. Al igual que ThingSpeak, tiene una librería de Arduino dedicada a la integración de dispositivos IoT con la consola en línea. Utiliza un API y una dirección web donde podremos enviar a tiempo real la información recopilada. Como se observa en la Figura 53, Firebase ofrece una base de datos a tiempo real que se actualiza cada vez que se envía algún dato. La visualización de los datos históricos y la creación de paneles de control no están integrados en la misma consola, sino que hay que instalar otros softwares para que se puedan mostrar. Debido a la complejidad de este sistema, se opta por la opción de InfluxDB y Grafana, la cual como ya se ha comentado previamente, nos ofrece la solución a nuestro objetivo y requerimientos.

Sin embargo, esta herramienta de Google puede ser muy interesante en otros campos y aplicaciones como los videojuegos, creación de aplicaciones o de páginas webs.

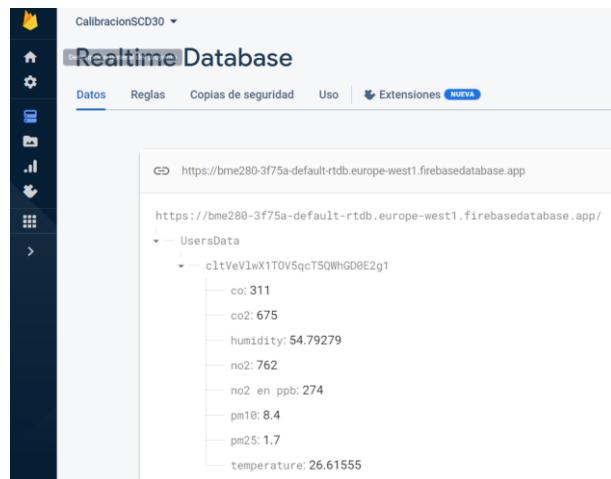


Figura 53 Visor a tiempo real de Firebase

El código utilizado se encuentra en el repositorio de [Github](#).

5. Memoria técnica

La realización del procedimiento experimental se ha realizado al tener correctamente el código implementado para la lectura de los sensores.

Primeramente, se ha llevado a cabo la creación de una estación fabricada por impresión 3D. A continuación, se han realizado una serie de pruebas a los sensores para comprobar y analizar el comportamiento y las medidas. Al no tener disponer de dispositivos de calibrado específicos para nuestros sensores, se han diseñado unas pruebas para comprobar la respuesta de los sensores a fuentes de emisión de los gases o variables a tratar.

5.1. Diseño y ensamblaje de la estación de calidad del aire

Para la comodidad y la correcta adecuación nuestros sensores, se ha realizado el diseño y ensamblaje de una caja que sirva como estación de toma de datos. La elección de la estación utilizando la impresión 3D, no solo ha venido dada por el gran interés personal y el auge en este tipo de fabricación, sino que intrínsecamente se encuentra ligado a la esencia del trabajo y de los proyectos *IoT* de este calibre. [66],...

Otro factor ha sido la posibilidad de poder adaptar la caja a los requerimientos de los sensores y la pantalla. El sensor SDS011, tal como se ha comentado en su apartado, tiene que ser utilizado en la posición especificada por el proveedor, asimismo tiene que poder tener una apertura en la parte de la boquilla, para que las partículas entren en el sensor. Es por ello, que se debe tener en cuenta en el diseño las aperturas de la estación para el análisis de los gases y variables a analizar.

Primeramente, se diseñó un modelo de una sola estación estanca, donde gracias a la separación por una pared divisoria, se tendría el microcontrolador, PCB y la batería alojada en el interior, y en la otra se encontrarían todos los sensores presentes en el trabajo. Finalmente, se diseñaba una tapa con la posibilidad de implementar la placa fotovoltaica para el sistema de carga de la batería. No obstante, este diseño presentaba una caja de grandes dimensiones y que al ser estudiado su posible impresión se concluyó que no era suficientemente óptima, además de ser económicamente más elevada.

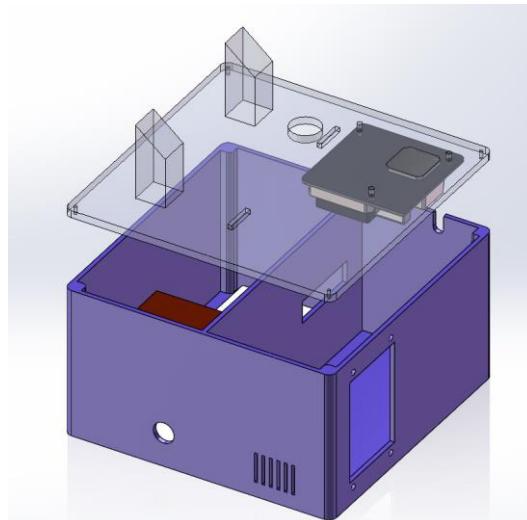


Figura 54 Primer diseño de la estación

La primera impresión se realizó en noviembre de 2022 en la impresora Prusa i3, la cual lamentablemente se produjo un problema durante la impresión, quedando inutilizado el extrusor y por ende la impresora en general.

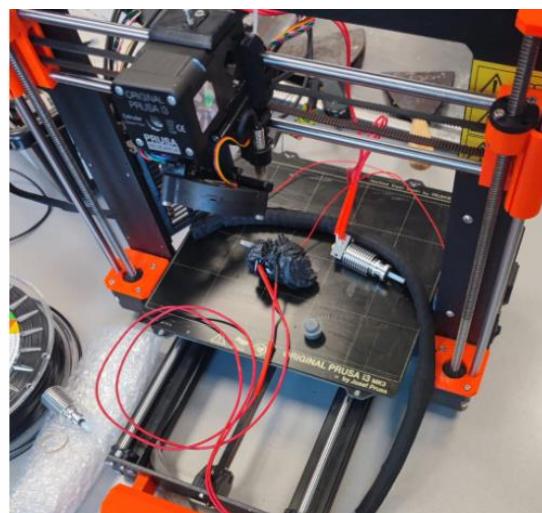


Figura 55 Impresora Prusa i3 dañada por error en impresión.

Se condujo a otro diseño, donde se realizarían dos cajas, la primera tendría toda la parte de control y visualización (placa, sistema de energía secundario, pantalla led...), y la segunda tendría los sensores. Con ello, se consiguió simplificar el modelo inicial, optimizando material y tiempo de impresión.

Las cajas están diseñadas para ser unidas mediante pegamento de contacto y las tapas superiores, se pueden extraer manualmente por el operario para cambiar o modificar el cableado. En algunos bordes de las tapas se han añadido diferentes elementos salientes para restringir el movimiento no deseado.

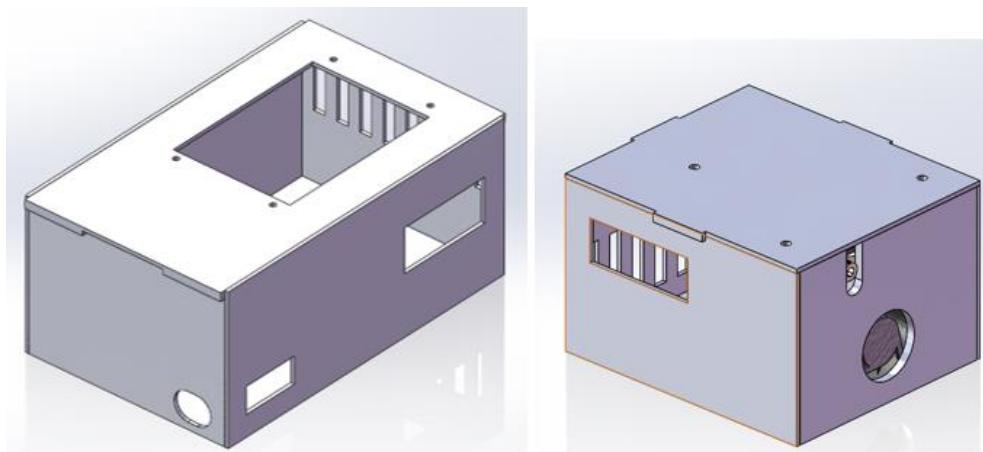


Figura 56 Modelos en SolidWorks de las dos cajas que forma la estación de calidad de aire

Finalmente, en verano de 2023, se cedió a la posibilidad de volver a imprimir las dos cajas en la impresora Ultimaker. En el transcurso de esta impresión no se obtuvo ningún problema o fallo de impresión.

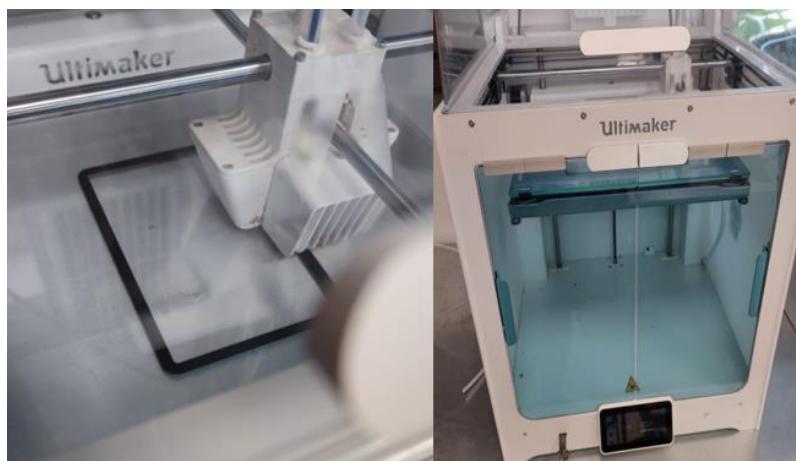


Figura 57 Principio de impresión y la impresora Ultimaker

Los planos de cada pieza y ensamblaje se encuentran en el apartado de Planos.

5.2. Prueba de calibración de temperatura

Para la calibración de la temperatura se ha realizado una serie de experimentos en el laboratorio químico de la Planta Piloto con 3 sustancias conocidas con puntos de ebullición evaluables por nuestros sensores.

Estos productos han sido Acetona, Etanol y Agua.

Tabla 4 Table de reactivos

Sustancia	Referencia	Punto de ebullición (°C)
Acetona	VWR Chemicals CAS: 67-64-1	56.6°C
Agua	-	100°C
Etanol	Panreac CAS: 64-17-5	78°C

Se ha utilizado el equipo de calefacción por manta eléctrica presente en el laboratorio químico de la planta Piloto, donde en un matraz de destilación se ha dispuesto del producto. Como se puede ver en la Figura 58, se ha adaptado acoplado en la boca de salida del matraz los sensores a calibrar.

El BME280, por su tamaño no ha dado ningún problema durante las pruebas. Así no ha sido para el caso del SHT31, el cual se encuentra integrado en el SCD30, el cual no se ha podido concluir debido al error en el sensor cuando por un simple contacto con la pared o cualquier gota condensada entraba en contacto con el sensor lo inutilizaba. Por ende, se ha procedido a utilizar el BME280 como el sensor de temperatura y humedad relativa de referencia, el cual es su propósito principal y como se ha podido observar en la comparativa de sensores, presenta unas mejores prestaciones para estos parámetros. El SHT31, será posteriormente comparado con el BME280 cuando estemos tomando datos del entorno, donde podremos observar su comportamiento en condiciones de campo y observar si presenta una gran diferencia entre ellos.

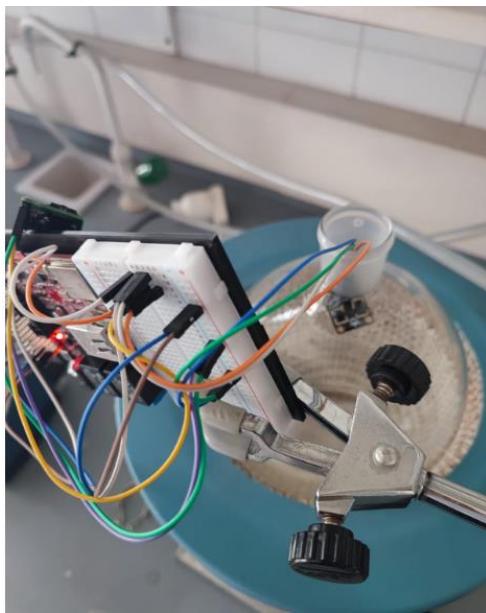


Figura 58 Prueba de temperatura

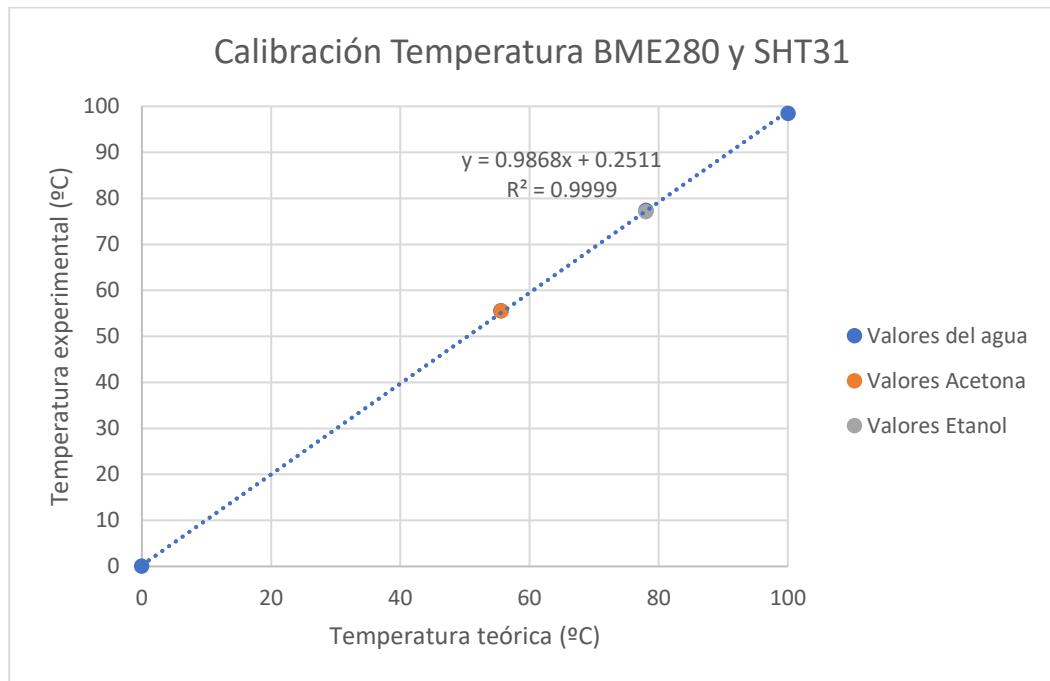


Gráfico 1 Prueba de temperatura en el sensor BME280

5.3. Prueba de calibración y linealidad del sensor SCD30

El sensor SCD30 viene ya calibrado de fábrica y también gracias a su librería dedicada en Arduino, presenta un código que permite la autocalibración, donde el sensor se debe exponer a aire limpio exterior (400 ppm) durante unos días.

Para comprobar la precisión y exactitud del sensor se requiere un sistema de gas de muestra de CO₂ y un entorno controlado el cual no tenemos disponible. No obstante, se ha diseñado una prueba utilizando la torre de destilación, un flujo de aire ambiente y una bombona de CO₂.

Para poder testear se ha utilizado las instalaciones de la Planta Piloto del IQS. Se ha utilizado la columna de destilación presente en dicho laboratorio.

Nuestra idea es utilizar la torre para mezclar ambos flujos de gases con caudales conocidos (aire seco y CO₂ de bombona). En nuestra columna, se mezclarán los dos flujos de gases, el primero es el flujo de aire seco que se bombea desde el ambiente exterior y el segundo flujo es el correspondiente a la bombona de CO₂. Ambos flujos se mezclarán y serán expulsados por la cabeza de columna donde se colocará el sensor. Para reducir el error, se ha taponado la salida por fondos con agua, para evitar fugas de la mezcla y obtener mejores resultados.

El caudalímetro de aire presente nos ofrece un rango de 5 m³/h de flujo, mientras que el de CO₂ nos aporta de 50 l/h a 500 l/h. En esta prueba, se irá combinando diferentes proporciones de flujos, para analizar la respuesta del sensor y observar si el sensor presenta una linealidad en los resultados. Así se podrá analizar la precisión de los resultados en la medida de concentraciones.



Figura 59 Torre de destilación con los dispositivos de medición en cabeza.



Figura 60 Caudalímetros de aire seco (izquierda) y de CO₂ (derecha)



Figura 61 Detalle de la toma de datos en cabeza

1º Prueba de CO2

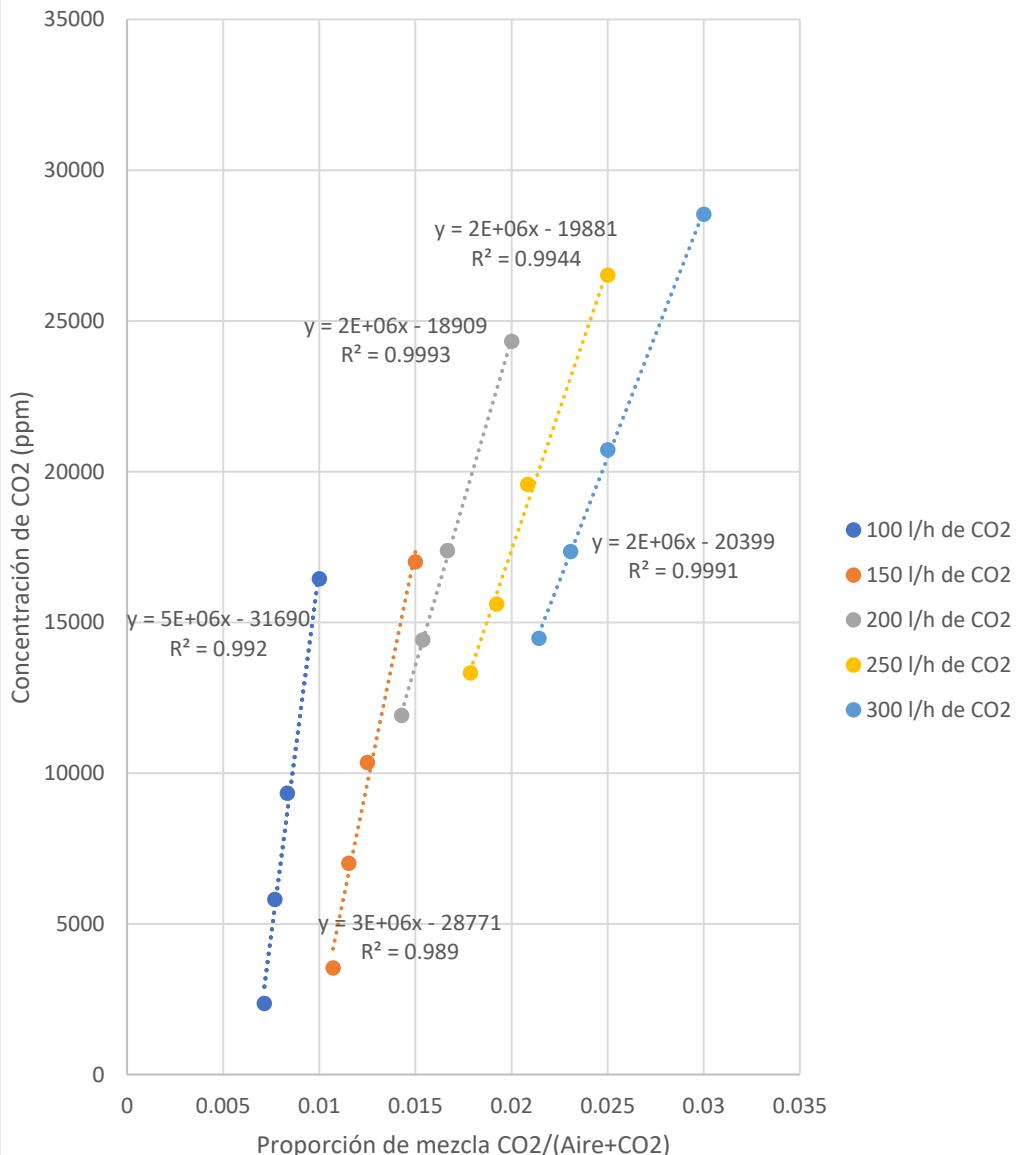


Gráfico 2 Primera prueba de linealidad del SCD30

2º Prueba de CO2

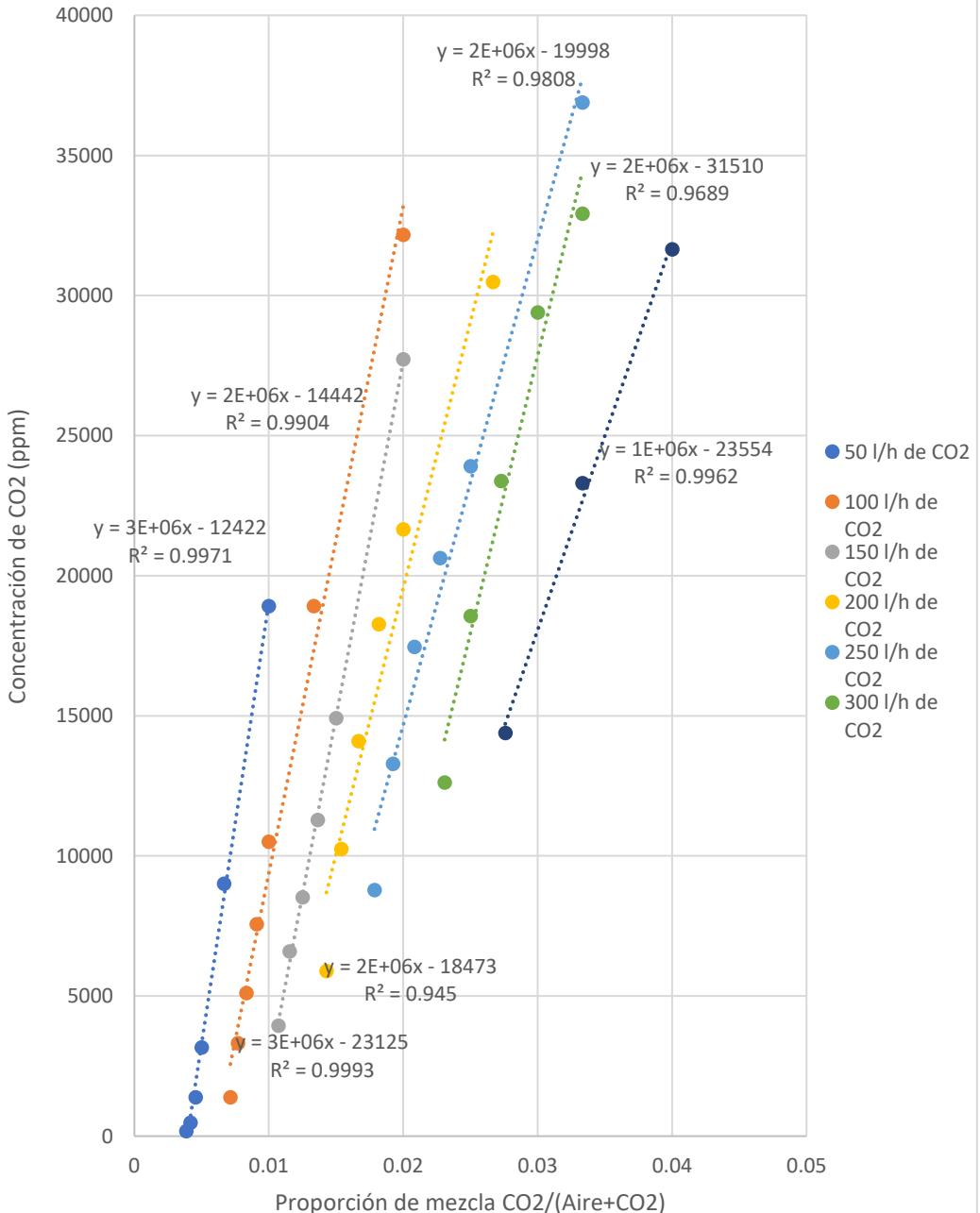


Gráfico 3 Segunda prueba linealidad del SCD30

Como se puede observar en ambas gráficas, la linealidad se cumple prácticamente en todos los casos. Las posibles variaciones en la precisión vienen dadas por el hecho de que nuestro sistema no es del todo fiable, ya que los caudalímetros no se mantienen fijos a lo largo de la experimentación, resultando en flujos de concentraciones no constantes. Además, como podemos comprobar comparando ambas gráficas, ambos días presentan diferentes resultados para la misma proporción de mezcla. Esto se debe a que no podemos determinar la calidad del aire seco que entra al sistema, ya que este puede estar más o menos contaminado por CO₂. Asimismo, en el punto de medición podemos tener corrientes externas que alteren las mediciones debido a la salida de gases de las aulas colindantes.

5.4. Sensor SeeedStudio Multichannel V2

Este sensor ha sido utilizado finalmente como sensor cualitativo. Al no disponer de la posibilidad de realizar pruebas con monóxido de carbono, ni dióxido de nitrógeno debido a su peligrosidad y ausencia de un entorno para realizar las pruebas, se decidió observar la respuesta del sensor a diferentes ambientes y estados.

Los chips del sensor deben de ser precalentados durante un tiempo determinado en las condiciones requeridas (48 horas), si el sensor no se ha utilizado recientemente y en un entorno con la mínima presencia de los gases contaminantes. Tras ello se puede proceder a la toma de datos.

Se procede a observar el comportamiento del sensor en un espacio limpio, donde la presencia de estos gases sea prácticamente nula o muy pequeña.

5.4.1. GM-102B

El GM-102B realiza la medición de concentración de dióxido de nitrógeno. A continuación, se muestran dos imágenes del panel de control con los resultados obtenidos.



Figura 62 Monitorización y evolución con Grafana del NO₂ (07/08/2023) en aire limpio.

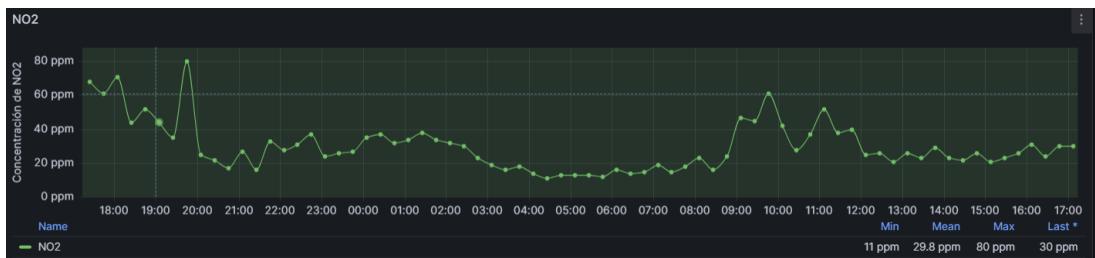


Figura 63 Monitorización y evolución con Grafana del NO₂ durante 24 horas (03/08/2023) en aire limpio

Como podemos observar en las Figuras 62 y 63 previas, el sensor marca una concentración entre “0-100 ppm”, en presencia de aire limpio. Este rango será nuestro rango de valores de referencia e indicadores de aire limpio. En Grafana se configurará para que el fondo de esta visualización en gráfica tenga un color verde claro cuando la estación se encuentre en un entorno limpio de NO₂.

5.4.2. GM-702B

Se repite las mismas pruebas en un entorno sin presencia de monóxido de carbono para el chip GM702B. La primera prueba se realizó el 2 de julio de 2022 para este sensor y podemos observar sus resultados en la Figura 64. En la Figura 65 se observa el comportamiento en otra prueba realizado en otro periodo de tiempo con las mismas condiciones externas.

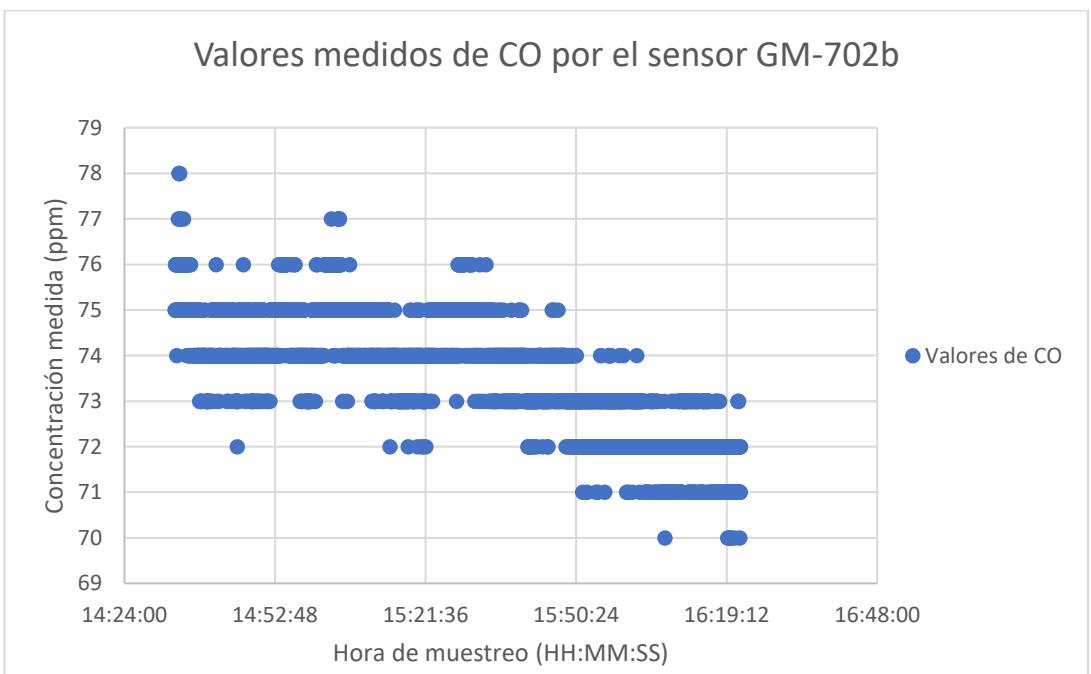


Figura 64 Monitorización de los datos de CO en aire limpio.



Figura 65 Monitorización y evolución con Grafana del CO durante 24 horas (03/08/2023) en aire limpio.

Las pruebas realizadas al sensor en aire “limpio” para este chip nos dan rango de referencia de “0-80 ppm”. Al igual que en la configuración del GM-102B, modificaremos la configuración de Grafana para obtener un color verde claro cuando la presencia del CO sea nula o muy pequeña.

Tras estas pruebas podemos obtener una información la cual nos indica cuando hay una presencia despreciable de los gases contaminantes medidos. Para observar la presencia de los gases y crear unos límites y rangos de alerta, se realizó una prueba de la estación a la salida del tubo de combustión de dos vehículos. Esta prueba se encuentra en el apartado siguiente (5.5.).

La documentación proporcionada por el vendedor no es bastante fiable, y los chips que han sido utilizados por el fabricante en su hoja de fabricación, realiza sus ensayos en condiciones de laboratorio muy específicas y que no podemos replicar. Además, solo existe una biblioteca de Arduino adaptada a este sensor, donde los archivos internos en formato .ccp no aportan mucha información para poder modificar o ajustar los parámetros internos de funcionamiento.

En conclusión, este sensor hoy en día presenta una carencia a nivel de adecuación al usuario. El vendedor ya informa que este código y sensor se deben utilizar de forma no precisa, si no cualitativa. Finalmente se opta por adaptar este sensor a la estación de manera informativa, de manera que sirva de alerta cuando la presencia del gas sea significativa. La inclusión más eficiente para este sensor radica en interiores o espacios cerrados. [49]

5.5. Prueba integral de los sensores frente a la salida de gases de automoción

La estación fue colocada a medio metro de la salida del tubo de escape de dos modelos de coche, de diferente ciclo de funcionamiento: un Mazda MX-5 NC1 del 2008, gasolina (ciclo Otto), y a un Lexus RC300h del 2011 de tipo híbrido con motor de combustión de ciclo Atkinson (gasolina).



Figura 66 Prueba de gases, Lexus híbrido (izquierdo) y Mazda MX-5 (derecha)

Para ambos vehículos se empezó la prueba en frío y se dejó en ralentí.

La primera prueba se realizó en el Mazda MX-5 llevando el motor a 2000 RPM durante unos segundos tras su esperar unos segundos desde el arranque inicial. Seguidamente se procedió a alejar el coche de los sensores. A continuación, se vuelve a aproximar el vehículo durante unos instantes y se enciende el aire acondicionado. Posteriormente repetimos la acción de alejar y aproximar el coche. Estas acciones se pueden observar en las Figuras 67, 68 siguientes y que corresponden al periodo desde las 18:25 hasta las 18:45.

Si observamos las mismas gráficas, pero analizando los datos desde las 18:53 hasta el fin de la toma de datos, tenemos la información recopilada de los sensores para el Lexus RC300h.

A continuación, se presentan las diferentes gráficas en Grafana.

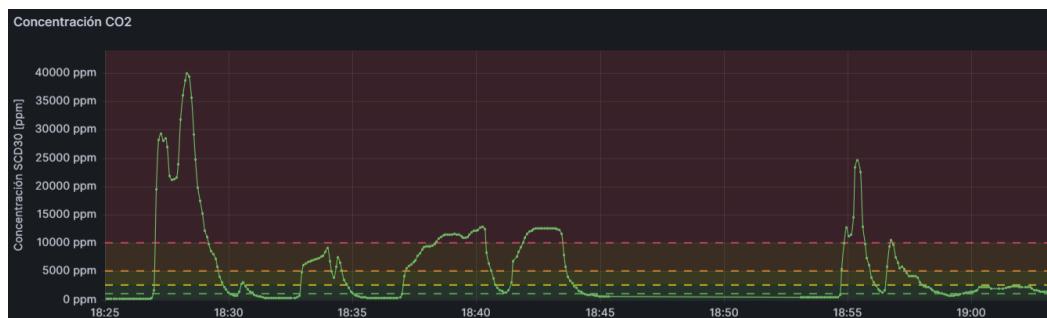


Figura 67 Monitorización de Grafana del CO₂ del sensor SCD30



Figura 68 Monitorizaciones del NO₂, CO y partículas en suspensión mediante Grafana

Comparando ambos coches, podemos observar que el Mazda tiene una emisión de CO₂ mucho mayor en encendido, llegando a valores de 30000 ppm, mientras que cuando se pone en marcha el motor Atkinson, el valor se encuentra en los 25000. Debido al funcionamiento del híbrido, el motor térmico se encenderá y apagará según el requerimiento energético del vehículo, es decir no tenemos una forma de forzarlo a mantenerse activo a voluntad. No obstante, en la prueba el motor se volvió a conectar y observamos un segundo pico de CO₂ mucho menor al anterior de 10000 ppm.

En cuanto a monóxido de carbono, el MX-5 presenta diferentes picos de concentración al inicio y la aceleración. Al arranque presenta un máximo de 764 ppm y en aceleración de 857 ppm. Los siguientes picos observados (18:30-18:35) son los correspondientes a los movimientos de acercar y alejar el vehículo, tomando valores pico de 640 ppm. El coche de la marca Lexus también presenta un pico de concentración de CO, pero inferior al del biplaza. El valor pico conseguido en el híbrido en arranque es de 685 ppm.

Para los niveles de NO₂, prácticamente no se observan concentraciones significativamente altas medidas en el Lexus, sin embargo, el vehículo de Mazda presenta diferentes picos superando los valores de 500 ppm. La diferencia entre ambos coches radica en su funcionamiento interno, el motor de gasolina de Mazda realiza la combustión a temperaturas más altas (ciclo Otto), provocando la emisión y formación con más facilidad del NO₂.

Una diferencia notable que observamos entre ambos coches es el pico de partículas en suspensión PM10 generadas por el vehículo híbrido en el primer arranque inicial. La explicación más plausible es que este coche ha estado más tiempo parado y, por tanto, debía

presentar más cantidad de partículas en el interior del motor y conductos de escape. Estos contaminantes fueron expulsados tras la puesta en marcha del motor.



Figura 69 Configuración aplicada de colores de Grafana para el CO



Figura 70 Configuración de colores de Grafana para el NO2

Finalmente, gracias a las pruebas realizadas, se han configurado diferentes niveles de colores en Grafana para alertar de la presencia de los gases contaminantes referidos al dióxido de nitrógeno y al monóxido de carbono, consiguiéndose así dar una cierta medida cuantitativa y cualitativa a los datos extraídos por los sensores del Multichannel Gas Sensor V2.

Para el sensor GM102B:

- Verde claro: “0-100 ppm” = Presencia nula o ambiente limpio.
- Azul: “100-250ppm” = Presencia moderada de NO2.
- Naranja: “250-360ppm” = Presencia alta de NO2.
- Rojo >360ppm = Ambiente contaminado de NO2.

Para el sensor GM702B:

- Verde claro: “0-80 ppm” = Presencia nula o ambiente limpio.
- Azul: “80-130ppm” = Presencia ligera de CO.
- Amarillo: “130-200ppm” = Presencia moderada de CO.
- Naranja: “200-300ppm” = Presencia moderada de CO.
- Rojo “>300ppm” = Ambiente contaminado de CO.

5.6. Implementación de monitorización continua en vivienda

Finalmente se instaló en la terraza de una vivienda en Reus, la estación para monitorizar la calidad de aire de esta. A continuación, se muestran algunos datos recogidos durante diferentes periodos, representados en el panel de control de Grafana.



Figura 71 Datos recopilados temperatura y humedad en Reus

En la Figura 71, se observa la información de temperatura y humedad recogida durante los días 23 de agosto a 27 de agosto, donde se produjo la ola de calor que estuvo afectando a la península los días previos a la medición y el día 23. Asimismo, se puede examinar la bajada de temperaturas provocada por las tormentas y la bolsa de aire frío del día 27, consiguiéndose unas temperaturas durante el día inferiores a los 30 grados.

6. Valoración económica e impacto medioambiental

6.1. Costes

A continuación, se presentan los costes actuales de la realización del trabajo. Se ha tenido en cuenta toda la parte electrónica, cableado, materiales de unión, equipos de medición, equipos de soldadura, reactivos y el coste personal.

Tabla 5 Costes

Unidades	Elemento	Empresa	Coste €
1	Olimex ESP-32-EVB	Olimex	19.95
1	MOD-LCD2.8RTP	Olimex	15
1	Sensor SEN0335	DFROBOT	19.99
1	Sensor SCD30	Sensirion	54
1	Multichannel Gas Sensor V2	SeeedStudio	30
1	Sensor Nova PM Sensor SDS011	Nova Fitness Co	33.99
1	Tarjeta microSD 32GB	Sandisk	5.99
1	Board	AZDelivery	4.99
1	Cableado electrónico Dupont	DSD Tech	9.49
1	Batería LiPo	Mikro	13.99
1	Adafruit BQ24074	Adafruit	14.99
1	Solar Panel 1.5W		17.94
1	Lector Tarjetas SD/MicroSD	Vanja	7.99
1	Ventilador F251R	Nidec	9.99
1	Kit de Soldadura	Waxrhedyd	19.99
1	SuperGlue3	Loctite	6.99
1	Masilla adhesiva reutilizable	Pritt	1.19
1	Impresión 3D		32
Total de diseño y ensamblaje de la estación de calidad de aire			318.47
Reactivos para los tests			Coste
1	Bombona CO2	Linde	800
1	Acetona	VWR Chemichals	48
1	Etanol absoluto	PanReac	38
Total de reactivos			886
Mano de obra			
Trabajador	Tiempo estimado (h)	Salario	Coste
Ingeniero Industrial	330	8	2640
TOTAL			3844.47

La estación de calidad de aire ha costado **318.47** euros y un total global de **3844.47** euros.

6.2. Impacto Medioambiental

Se realiza un estudio de las emisiones de gases de efecto invernadero que se han emitido de forma directa y su efecto en el medioambiente. Para ello, debemos de tener en cuenta el caudal de CO₂ utilizado para las pruebas y el uso continuo del ordenador y de la estación de calidad de aire.

La experimentación con CO₂ se estima que se realizó 1 hora de ensayos con un total de 1050 l/h de producto gastado.

$$1050 \frac{l}{h} \text{ de } CO_2 \times 1.845 \frac{g}{l} \times 1 \text{ hora de experimentación} = 1940.4 = 1.94 \text{ kgCO}_2$$

Tomando en cuenta que el ordenador y la estación de calidad de aire consume aproximadamente una media de 50W y se ha utilizado a lo largo de la totalidad del trabajo unas 330 horas, podemos calcular kgCO₂ emitidos. Si se considera que el último factor de emisión de la mix energético español de 2022 es de 0.273 kgCO₂/kWh [67], obtenemos:

$$50 \text{ W} \times 330 \text{ horas} = 16500 \text{ Wh} = 16.5 \text{ kWh}$$

$$16.5 \text{ kWh} \times \frac{0.273 \text{ kgCO}_2}{\text{kWh}} = 4.5 \text{ kgCO}_2$$

En total se ha emitido directamente **6.44 kgCO₂**, el cual presenta un impacto muy pequeño. Sin embargo, no se tiene en cuenta las emisiones indirectas o la extracción, fabricación y envío de los sensores y dispositivos, ni el coste de almacenamiento en la nube por parte de los servidores.

Así mismo, nuestro trabajo tiene como naturaleza el análisis y monitorización de la calidad del aire tiempo real. Por lo tanto, estamos realizando una tarea con amplias ventajas tanto a corto y largo plazo sobre el control de la contaminación de nuestro entorno y alertando de posibles fugas en equipos o procesos que puedan emitir gases nocivos al medioambiente.

7. Cronograma

Las horas implicadas han sido computadas en 12 ECTS (1 ECTS = 25 horas), calculándose en total como 330 horas. Este es el tiempo que se ha estimado y configurado para la realización del trabajo.

El trabajo tuvo inicio en el semestre de 4º Grado en 2022, sin embargo, por motivos académicos, la memoria corregida del proyecto ha sido presentada en septiembre de 2023. Es por ello por lo que en la cronología existe un vacío durante el curso académico 2022-2023.

La gran parte del tiempo dedicado al proyecto ha sido en la configuración, codificación de todos los dispositivos electrónicos y plataformas en la nube que conforman la estación de calidad del aire, asimismo la redacción de la memoria.

A continuación, se muestra la cronología del trabajo estimada:

Actividad	2022							2023				Horas estimadas (h)
	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Noviembre	Mayo	Junio	Julio	Agosto	
Definición y primera toma de contacto												2
Documentación inicial												10
Configuración de la tarjeta ESP32												10
Estudio de mercado de sensores												12
Código												40
Impresión 3D												12
Ensamblaje del equipo												6
Programación InfluxDB y Grafana												20
Pruebas CO2												6
Pruebas Temperatura												4
Puesta en marcha estación												80
Redacción y revisión de memoria												130
TOTAL												332

Figura 72 Cronograma

8. Conclusiones

Se ha realizado una estación portátil, la cual recoge y envía los datos de la calidad de aire de los sensores integrados. En ella se integra la placa de desarrollo Olimex ESP32-EVB-EA con los sensores SEN0335, SDS011, SCD30 y Multichannel Gas Sensor V2. Los parámetros medidos son la temperatura, humedad, dióxido de carbono, monóxido de carbono, partículas de suspensión y dióxido de nitrógeno.

El coste material de la estación ha sido de 318.47 euros.

Los datos recogidos son enviados en la nube donde serán almacenados durante 30 días (gracias a los planes gratuitos escogidos) y en la microSD localmente, en formato .csv.

Los sensores han sido probados en diferentes entornos para comprobar su comportamiento frente a fuentes de emisión de los gases a analizar.

Los sensores económicos y de bajo consumo han presentado buenos resultados con relación a sus prestaciones y el valor.

La integración de los dispositivos a la plataforma de Arduino IDE, InfluxDB y Grafana Cloud ha sido exitosa. La mayoría de los códigos que forman parte de la estación, son obtenidos y/o modificados de librerías públicas disponibles para su uso por los programadores y usuarios.

La implementación de la estación de calidad de aire diseñada es más eficaz y precisa si se aplica a interiores o entornos controlados. Para exteriores, se debería de tener de tener unos sensores más precisos y de mayor calidad, no obstante, esta configuración presentada, podría servir de apoyo continuo a las estaciones fijas oficiales, como indicadores orientativos en tiempo real para el usuario.

Escalabilidad y flexibilidad en tanto el software, dispositivos, así como el alcance de la estación.

8.1. Líneas de mejora

La calibración y pruebas realizadas de los sensores deberían de ser más exhaustivas y precisas. Aun así, varios de los sensores necesitan más información por parte del fabricante y/o más detalle en el funcionamiento de las librerías de funcionamiento.

InfluxDB y Grafana tiene muchas más opciones de configuración y personalización. Estas pueden ser muy útiles para mejorar la visualización de cara al usuario.

La caja a impresión 3D ha sido una solución fácil y rápida, no obstante, se podría a ver optimizado mejor.

9. Bibliografía

- [1] E. Salamanca-Fernández, M. Rodríguez Barranco, and M. J. Sánchez, "INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA AMBIENTAL Y LA CONTAMINACIÓN EN LA TRANSMISIÓN DEL SARS-COV-2," 2021. [Online]. Available: www.mscbs.es/respCorrespondencia:
- [2] World Health Organization, "Health and environment scorecard Spain," 2023. Accessed: Jul. 23, 2023. [Online]. Available: https://cdn.who.int/media/docs/default-source/country-profiles/environmental-health/environmental-health-esp-2023.pdf?sfvrsn=e1b2009c_5&download=true
- [3] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, "EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE EN ESPAÑA," 2023. Accessed: Jul. 26, 2023. [Online]. Available: https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/informeevaluacioncalidadadairaeespana2022_tcm30-590211.pdf
- [4] IEEE Internet Initiative, "IoT Towards Definition Internet of Things Revision," *IEEE*, 2015.
- [5] European Environment Agency, "El número de muertes prematuras debido a la contaminación atmosférica sigue disminuyendo en la UE pero hay que redoblar esfuerzos para eliminar las sustancias tóxicas del medio ambiente," Aug. 03, 2023.

- [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/es/highlights/el-numero-de-muertes-prematuras#:~:text=En%20la%20UE%20se%20producen,salud%20de%20la%20polaci%C3%B3n%20europea>.
- [6] C. C. and E. European Comission - Energy, "Air Quality," 2023, [Online]. Available: https://environment.ec.europa.eu/topics/air/air-quality_en
- [7] Ministerio Para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, "Normativa Española," 2023. <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/normativa/normativa-espanola.html>
- [8] M. A. i S. Generalitat de Catalunya, "Qualitat del aire - Normativa," 2019. https://medioambiente.gencat.cat/es/05_ambits_dactuacio/atmosfera/qualitat_de_laire/valors_legislats_de_la_qualitat_de_laire/index.html
- [9] Ajuntament de Barcelona, "Qualitat del Aire," 2023. <https://ajuntament.barcelona.cat/qualitataire/ca/>
- [10] Ajuntament de Barcelona, "Mapa ZBE Barcelona".
- [11] European Comission, "Air Quality Law," 2023. https://environment.ec.europa.eu/topics/air/air-quality_en#law
- [12] Ministerio Para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, "Redes de vigilancia de la calidad del aire," 2023. <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/evaluacion-datos/redes.html> (accessed Jul. 18, 2023).
- [13] CASELLA, "HD21AB17 – Monitor Calidad De Aire."
- [14] K&F CONCEPT, "Estación Meteorológica y Sensores Domésticos GW40.0006," 2023. https://www.kentfaith.es/GW40.0006_detectar-monitores-de-calidad-del-aire-interior-pm2-5-pm10-aqi-temperatura-y-humedad-y-llamar-a-la-p
- [15] Gobierno de España, "Visor del Índice Nacional de Calidad de Aire." <https://ica.miteco.es/>
- [16] EPA, "Emisiones de dióxido de carbono," Jun. 2023, [Online]. Available: <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/emisiones-de-dioxido-de-carbono>
- [17] Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes, "CO2," 2007. <https://prtre.es.es/co2-dioxido-de-carbono,15590,11,2007.html>
- [18] I. Blumenthal, "Carbon Monoxide Poisoning," *J R Soc Med*, vol. 94, no. 6, pp. 270–272, Jun. 2001, doi: 10.1177/014107680109400604.

- [19] D. Loomis, W. Huang, and G. Chen, "The International Agency for Research on Cancer (IARC) evaluation of the carcinogenicity of outdoor air pollution: focus on China," *Chin J Cancer*, vol. 33, no. 4, pp. 189–196, Apr. 2014, doi: 10.5732/cjc.014.10028.
- [20] EFE, "Activado un aviso preventivo de contaminación por partículas en el área metropolitana de Barcelona," Barcelona, Jun. 22, 2023. Accessed: Jul. 01, 2023. [Online]. Available: <https://www.lavanguardia.com/local/baix-llobregat/20230622/9060888/activan-aviso-preventivo-contaminacion-particulas-area-metropolitana-barcelona.html>
- [21] Organización Mundial de la Salud, "WHO guidelines for indoor air quality: dampness and mould," 2009. <https://www.who.int/airpollution/guidelines/dampness-mould/en/>
- [22] DFRobot, "How the MEMS Gas Sensor Works."
- [23] M. I. A. Asri, Md. N. Hasan, M. R. A. Fuaad, Y. Md. Yunos, and M. S. M. Ali, "MEMS Gas Sensors: A Review," *IEEE Sens J*, vol. 21, no. 17, pp. 18381–18397, Sep. 2021, doi: 10.1109/JSEN.2021.3091854.
- [24] G. Spasov, M. Kutseva, G. Petrova, and V. Tsvetkov, "A Smart Solution for Electrical Power Monitoring Based on MCP39F501 Sensor," in *2019 IEEE XXVIII International Scientific Conference Electronics (ET)*, IEEE, Sep. 2019, pp. 1–4. doi: 10.1109/ET.2019.8878502.
- [25] С. Йорданов *et al.*, "ИНТЕЛИГЕНТНА СИСТЕМА ЗА ОКАЧЕСТВЯВАНЕ НА ХРАНИТЕЛНИ ПРОДУКТИ БАЗИРАНА НА ESP32 И ГАЗОВИ СЕНСОРИ. INTELLIGENT SYSTEM FOR QUALIFICATION OF FOOD PRODUCTS BASED ON ESP32 AND GASS SENSORS," 2019.
- [26] Olimex, "UEXT Modules." <https://www.olimex.com/Products/Modules/> (accessed Apr. 20, 2022).
- [27] I. Technology Corp http, "ILI9341V a-Si TFT LCD Single Chip Driver 240RGBx320 Resolution and 262K color Datasheet." [Online]. Available: <http://www.ilitek.com>
- [28] MIKROE, "Product Specification Li-ion Polymer Battery Product Specification 可充电锂离子电池 产品规格书 Product Specification History of specification 规格书修订记录 Date Contents Remarks Product Specification," Belgrade, 2018.
- [29] Adafruit, "Adafruit Universal USB / DC / Solar Lithium Ion/Polymer charger - bq24074," Sep. 16, 2020. <https://learn.adafruit.com/adafruit-bq24074-universal-usb-dc-solar-charger-breakout/overview> (accessed Jun. 20, 2022).

- [30] Arduino para todos, “DHT22 y DHT11 sensores de temperatura y humedad con Arduino,” Dec. 19, 2016. <http://arduparatomos.blogspot.com/2016/12/dht22-y-dht11-sensores-de-temperatura-y.html>
- [31] Bosch, “Bosch BMP280 Datasheet,” Oct. 2021.
- [32] Hanwei Electronics Co. LTD, “MQ-135_Hanwei Datasheet”.
- [33] Sensirion, “Datasheet Sensirion SCD30 Sensor Module,” 2020. [Online]. Available: www.sensirion.com
- [34] Sensirion, “Sensirion_CO2_Sensors_SCD4x_Datasheet,” Apr. 2021.
- [35] DFRobot, “Sensor SEN0159 Wiki ,” 2023, [Online]. Available: https://wiki.dfrobot.com/CO2_Sensor_SKU_SEN0159
- [36] K. B. K. Sai, S. R. Subbareddy, and A. K. Luhach, “IOT based Air Quality Monitoring System Using MQ135 and MQ7 with Machine Learning Analysis,” *Scalable Computing: Practice and Experience*, vol. 20, no. 4, pp. 599–606, Dec. 2019, doi: 10.12694/scpe.v20i4.1561.
- [37] eMariete.com, “Medidor de CO2 con sensor MQ-135 ,” 2021. <https://emariete.com/medidor-co2-sensor-mq-135/>
- [38] T.K. Hareendran, “How to Use MQ-135 Gas Sensor,” Jul. 05, 2020. [https://www.codrey.com/electronic-circuits/how-to-use-mq-135-gas-sensor/#:~:text=While%20using%20the%20library%2Dsupported,1023.0\)\)%2D1\)*RL](https://www.codrey.com/electronic-circuits/how-to-use-mq-135-gas-sensor/#:~:text=While%20using%20the%20library%2Dsupported,1023.0))%2D1)*RL)
- [39] X. Liu, S. Cheng, H. Liu, S. Hu, D. Zhang, and H. Ning, “A Survey on Gas Sensing Technology,” *Sensors*, vol. 12, no. 7, pp. 9635–9665, Jul. 2012, doi: 10.3390/s120709635.
- [40] Prof. R. Pogge, “Astronomy 161: An Introduction to Solar System Astronomy,” Apr. 2008, [Online]. Available: <https://www.astronomy.ohio-state.edu/pogge.1/Ast161/Unit5/atmos.html>
- [41] soselectronic.com, “SCD30 is More Than Just the NDIR CO2 Sensor,” Mar. 29, 2018. <https://www.soiselectronic.com/en/articles/sensirion/scd30-is-more-than-just-the-ndir-co2-sensor-2152>
- [42] Nova Fitness Co. LTD., “Laser PM2.5 Sensor specification Product model: SDS011 Version: V1.3.” [Online]. Available: <https://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/X200/SDS011-DATASHEET.pdf>
- [43] DFROBOT, “Gravity PM2.5 Air Quality Sensor.” [Online]. Available: www.mouser.com

- [44] B. Alfano *et al.*, “A Review of Low-Cost Particulate Matter Sensors from the Developers’ Perspectives,” *Sensors*, vol. 20, no. 23, p. 6819, Nov. 2020, doi: 10.3390/s20236819.
- [45] A. Cavaliere *et al.*, “Development of Low-Cost Air Quality Stations for Next Generation Monitoring Networks: Calibration and Validation of PM2.5 and PM10 Sensors,” *Sensors*, vol. 18, no. 9, p. 2843, Aug. 2018, doi: 10.3390/s18092843.
- [46] N. H. Nguyen, H. X. Nguyen, T. T. B. Le, and C. D. Vu, “Evaluating Low-Cost Commercially Available Sensors for Air Quality Monitoring and Application of Sensor Calibration Methods for Improving Accuracy,” *Open Journal of Air Pollution*, vol. 10, no. 01, pp. 1–17, 2021, doi: 10.4236/ojap.2021.101001.
- [47] K. N. Genikomsakis, N.-F. Galatoulas, P. I. Dallas, L. Candanedo Ibarra, D. Margaritis, and C. S. Ioakimidis, “Development and On-Field Testing of Low-Cost Portable System for Monitoring PM2.5 Concentrations,” *Sensors*, vol. 18, no. 4, p. 1056, Apr. 2018, doi: 10.3390/s18041056.
- [48] SGXSensortech, “MiCS-6814 datasheet,” 2023. [Online]. Available: www.sgxsenso.tech
- [49] SeeedStudio, “Grove Multichannel Gas Sensor V2,” Jan. 2023, [Online]. Available: <https://wiki.seeedstudio.com/Grove-Multichannel-Gas-Sensor-V2/>
- [50] Honeywell, “Carbon Monoxide Detectors,” 2023. <https://buildings.honeywell.com/us/en/products/by-category/fire-life-safety/sensors-and-detectors/conventional-detectors/carbon-monoxide-detectors>
- [51] Alphasense, “Nitrogen Dioxide Sensors (NO₂),” 2023. <https://www.alphasense.com/products/nitrogen-dioxide/>
- [52] L. Zhengzhou Winsen Electronics TechnologyCo., “MEMS NO₂ Gas Sensor Manual,” Apr. 2019. [Online]. Available: www.winsen-sensor.com
- [53] L. Zhengzhou Winsen Electronics TechnologyCo., “MEMS Carbon Monoxide Gas Sensor Manual,” Aug. 2020.
- [54] SeeedStudio Forums, “Grove Multichannel gas sensor v2 calibration,” Jun. 2020. <https://forum.seeedstudio.com/t/grove-multichannel-gas-sensor-v2-calibration/253136> (accessed Jul. 01, 2023).
- [55] Forum Arduino, “Grove - Multichannel Gas Sensor V2 gives 0 ppm for each value with the current code,” Jan. 26, 2023. <https://forum.arduino.cc/t/grove-multichannel-gas-sensor-v2-gives-0-ppm-for-each-value-with-the-current-code/1082749> (accessed Jun. 30, 2023).

- [56] C. Wootton, “Serial Peripheral Interface (SPI),” in *Samsung ARTIK Reference*, Berkeley, CA: Apress, 2016, pp. 335–349. doi: 10.1007/978-1-4842-2322-2_21.
- [57] F. Leon, “Buses de datos en electrónica paralelo, UART, SPI, I2C,” Apr. 28, 2021. <https://www.dynamoelectronics.com/buses-de-datos-en-electronica-paralelo-uart-spi-i2c/> (accessed Jul. 20, 2023).
- [58] Anand N, G. Joseph, S. S. Oommen, and R. Dhanabal, “Design and implementation of a high speed Serial Peripheral Interface,” in *2014 International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE)*, IEEE, Jan. 2014, pp. 1–3. doi: 10.1109/ICAEE.2014.6838431.
- [59] OnionDOCS, “Communicating with Serial Devices.” <https://docs.onion.io/omega2-docs/uart1.html> (accessed Jul. 20, 2023).
- [60] ARDUINO, “What is Arduino?,” Feb. 05, 2018. <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction> (accessed Apr. 20, 2022).
- [61] ARDUINO, “Arduino IDE 2.1 is now available!,” 2023. <https://blog.arduino.cc/2023/04/21/arduino-ide-2-1-is-now-available/?queryID=undefined> (accessed Apr. 22, 2023).
- [62] Arduino.cc Forum, “IDE 2.0 and ESP32 Sketch Data Upload,” Sep. 21, 2021. <https://forum.arduino.cc/t/ide-2-0-and-esp32-sketch-data-upload/904160>
- [63] InfluxDB, “InfluxDB guides,” 2023. <https://docs.influxdata.com/influxdb/v1.8/guides/> (accessed Jun. 28, 2023).
- [64] GrafanaLabs, “Grafana Cloud documentation,” 2023. <https://grafana.com/docs/grafana-cloud/> (accessed Jun. 27, 2023).
- [65] T. Schuerg, “InfluxDB Arduino Client”, [Online]. Available: <https://github.com/tobiasschuerg/InfluxDB-Client-for-Arduino>
- [66] P. Bomke, “Resin printer electronics box,” Nov. 02, 2015. <http://robotsinthesun.org/build-log-part-3-resin-printer-electronics-box/> (accessed Jun. 20, 2022).
- [67] Generalitat de Catalunya, “Factor de emisión de la energía eléctrica,” May 2023, [Online]. Available: https://canviclimatic.gencat.cat/es/actua/factors_demissio_associats_a_lenergia/index.html#:~:text=El%20mix%20de%20la%20red%20el%C3%A9ctrica%20espa%C3%B3nola%20publicado%20por%20la,g%20CO2eq%2FkWh.

10. Planos

A

A

B

B

C

C

D

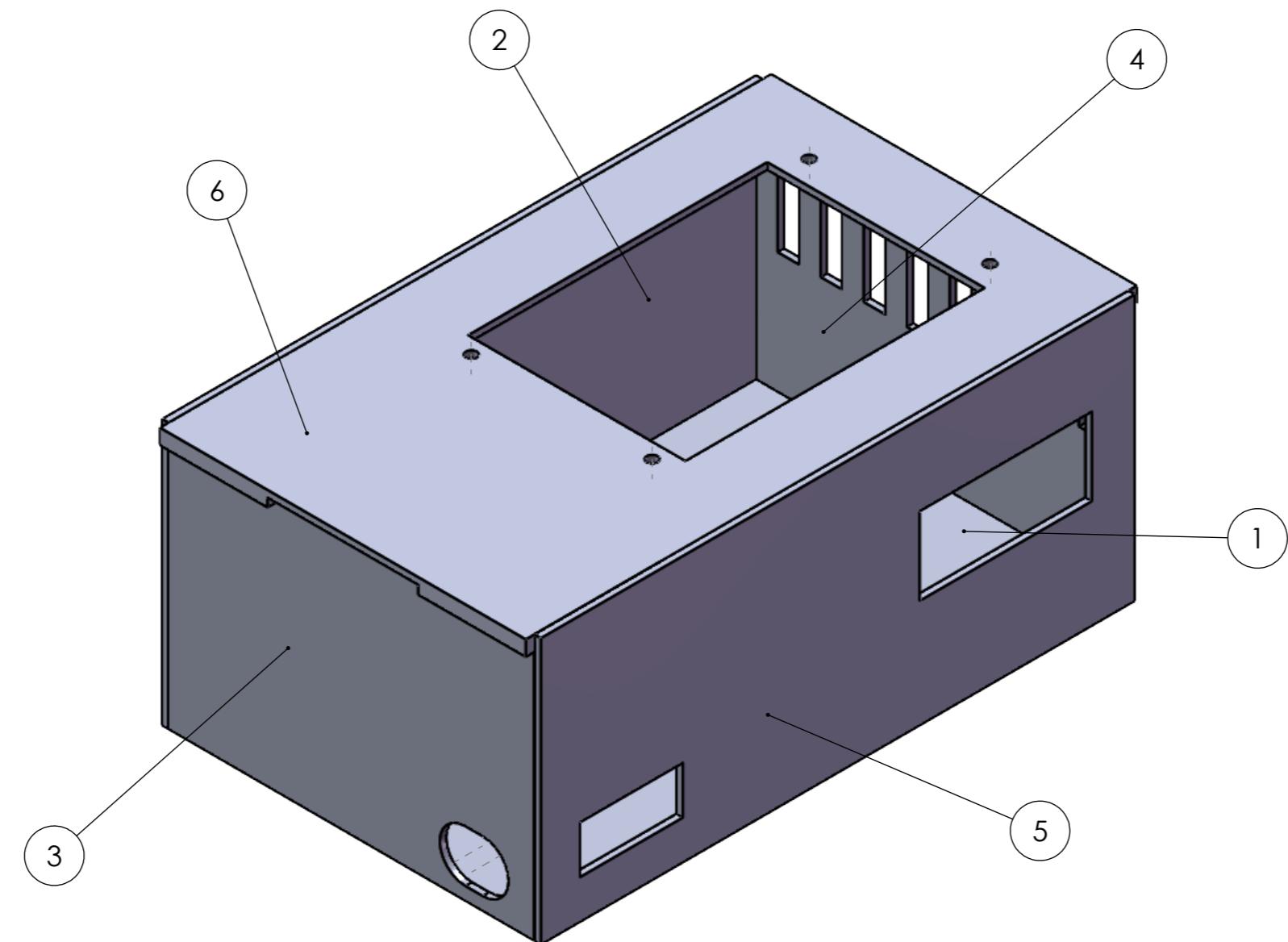
D

E

E

F

F



NO.	NAME	Material	Weight	Q	Sheet
1	BaseOlimexESP32	PLA	27gr.	1	2
2	LateralPlano	PLA	15gr.	1	3
3	Lateral USB	PLA	10gr.	1	4
4	Lateral Plano Pequeño	PLA	8gr.	1	5
5	TapaSensores	PLA	14gr.	1	6
6	TapaSuperiorPantalla	PLA	17gr.	1	7

Dibujado: Grupo: Hoja: Caja 1
Javier Martínez Calonge de fichero: PlanosCaja1.SLDDRW

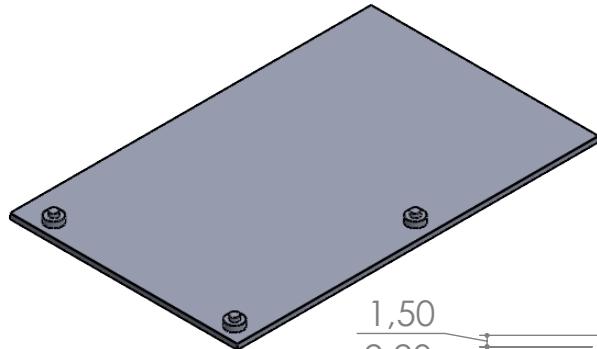
Revisado: Material: (Check Assembly) Ctdad.: 1



Fecha de entrega: Peso: Formato: Escala: Proyección:
02/09/2023 91gr. DIN A3 1:1

ATENCIÓN: no deducir cotas por medio de medición directa del plano HOJA 1 / 7

A

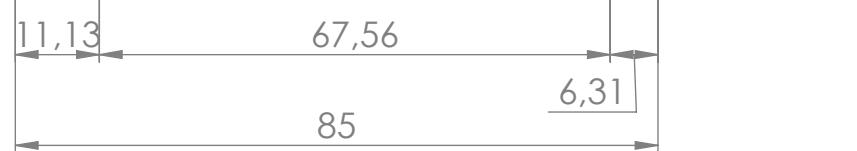


1,50

2,20

2

B



C

135

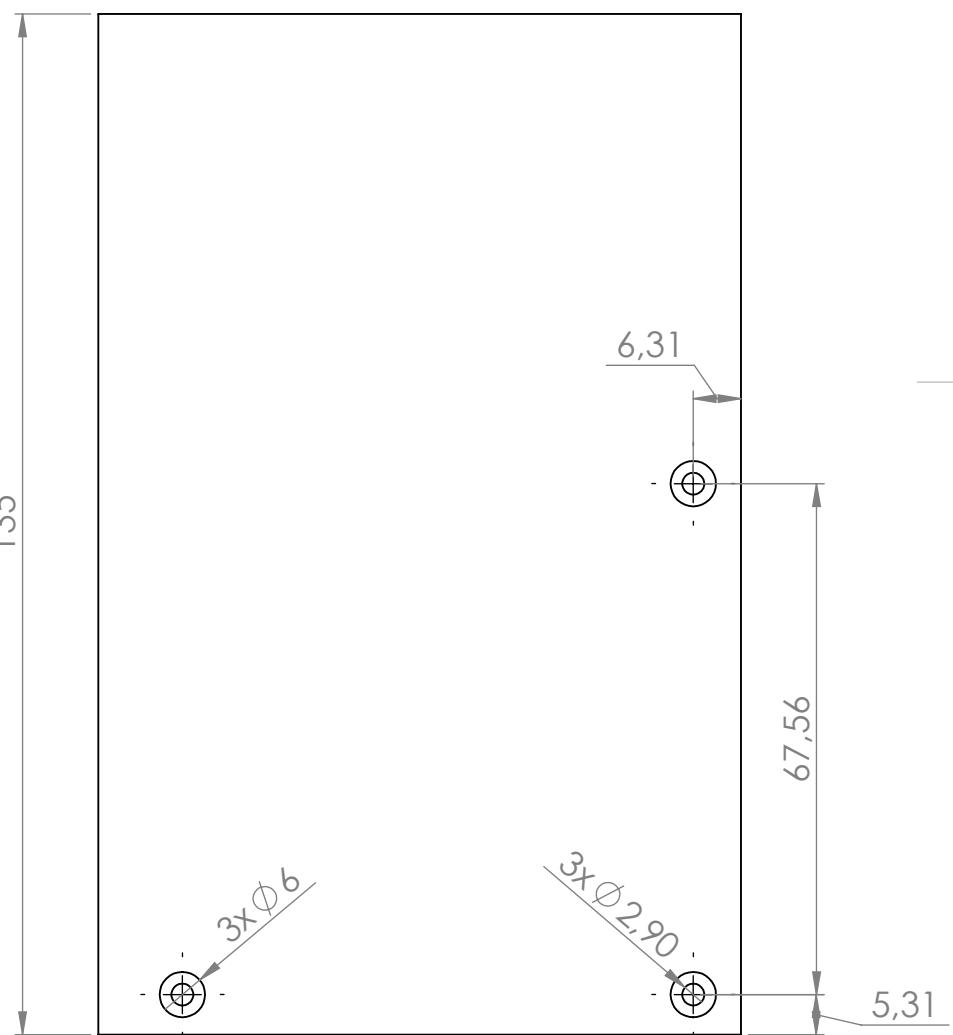
D

6,31

67,56

E

5,31



Dibujado:

Javier Martínez Calonge

Grupo:

Hoja: BaseOlimexESP32

de fichero: PlanosCaja1.SLDDRW

Revisado:

Material: PLA

Ctdad.: 1

PERSONA CIENCIA EMPRESA
Universitat Ramon Llull

Fecha de entrega:

02/09/2023

Peso:

27gr.

Formato:

DIN A4

Escala:

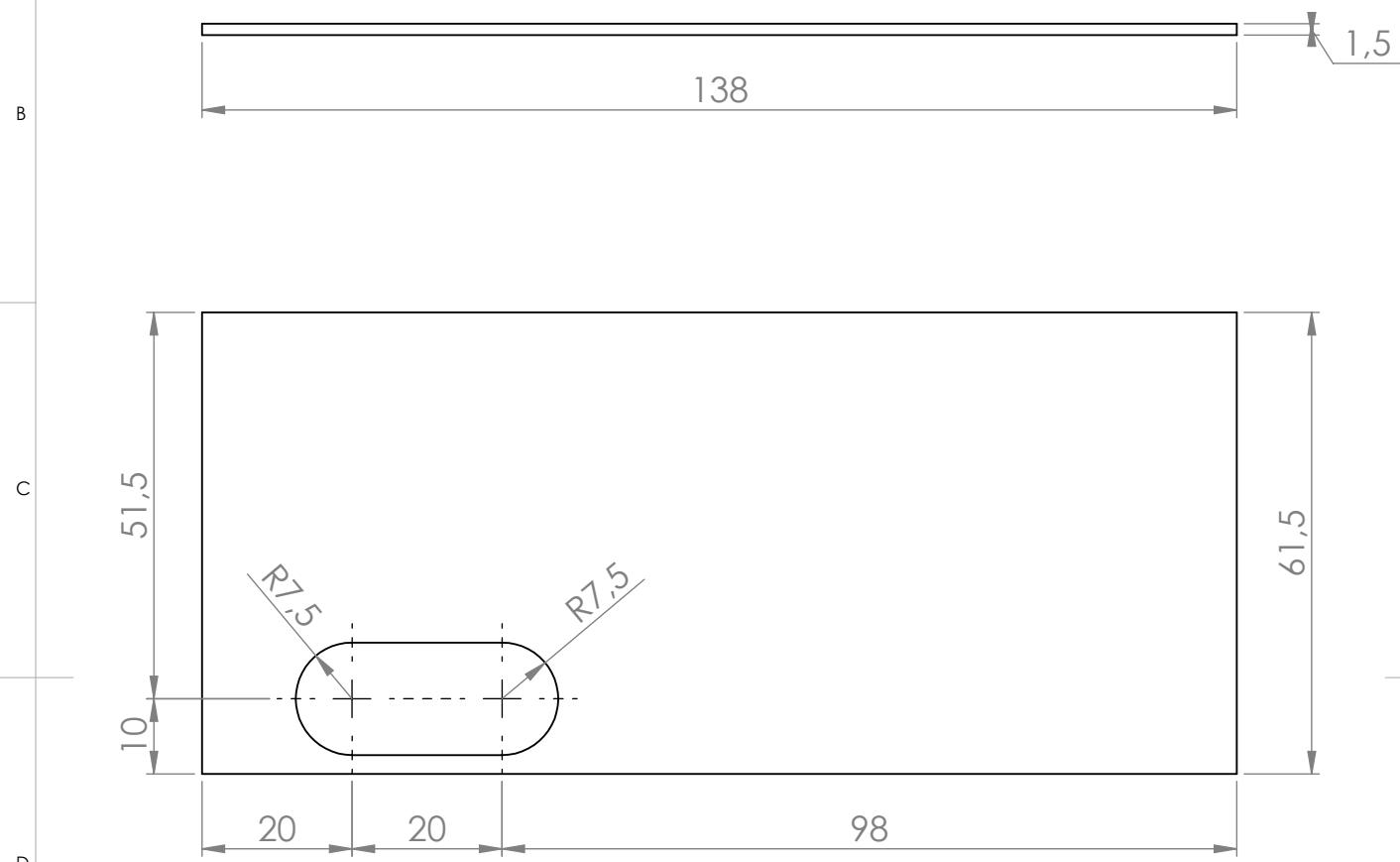
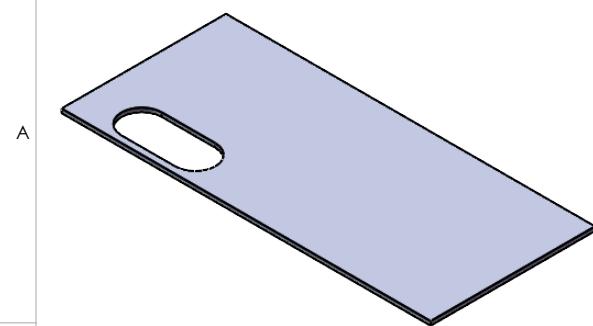
1:1

Proyección:



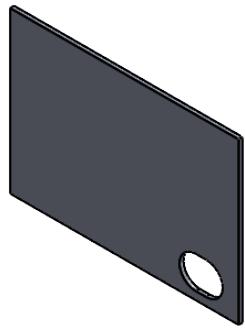
ATENCIÓN: no deducir cotas por medio de medición directa del plano

HOJA
2 / 7



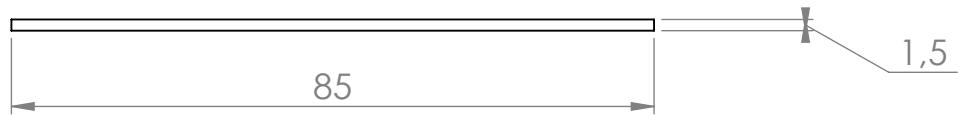
Dibujado:	Javier Martínez Calonge	Grupo:	Hoja: Lateral Plano		
Revisado:			de fichero: PlanosCaja1.SLDDRW		
F	Fecha de entrega:	Material: PLA	Ctdad.: 1		
	02/09/2023	Peso: 15gr.	Formato: DIN A4	Escala: 1:1	Proyección:
		ATENCIÓN: no deducir cotas por medio de medición directa del plano			HOJA 3 / 7

A



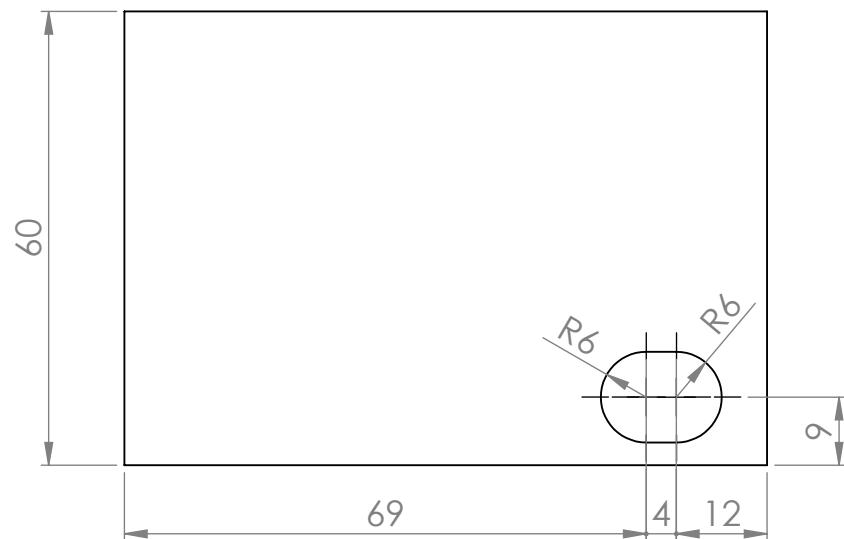
A

B



B

C



C

D

D

E

E

Dibujado:
Javier Martínez Calonge

Grupo:

Hoja: Lateral USB

de fichero: PlanosCaja1.SLDDRW

Revisado:

Material: PLA

Ctdad.: 1



PERSONA CIENCIA EMPRESA
Universitat Ramon Llull

Fecha de entrega:
02/09/2023

Peso:

10gr.

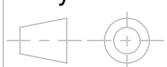
Formato:

DIN A4

Escala:

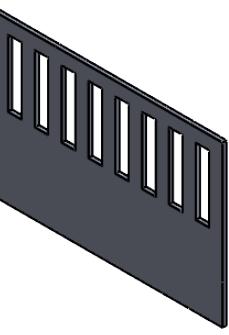
1:1

Proyección:



ATENCIÓN: no deducir cotas por medio de medición directa del plano

HOJA
4 / 7



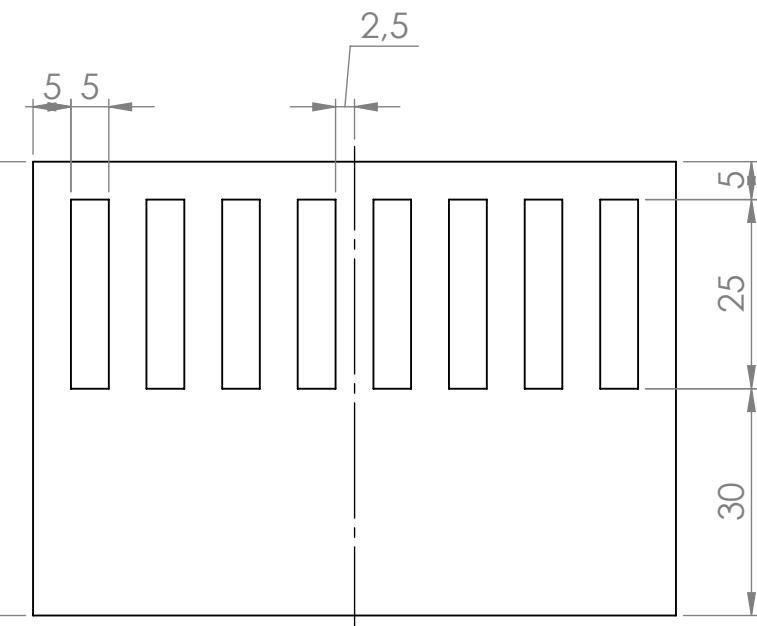
A

A



B

B



C

C

D

D

E

E

Dibujado:
Javier Martínez Calonge Grupo:
Hoja: Lateral Plano Pequeño
de fichero: PlanosCaja1.SLDDRW

Revisado:

Material: PLA

Ctdad.: 1



Universitat Ramon Llull

Fecha de entrega:
02/09/2023

Peso:
8gr.

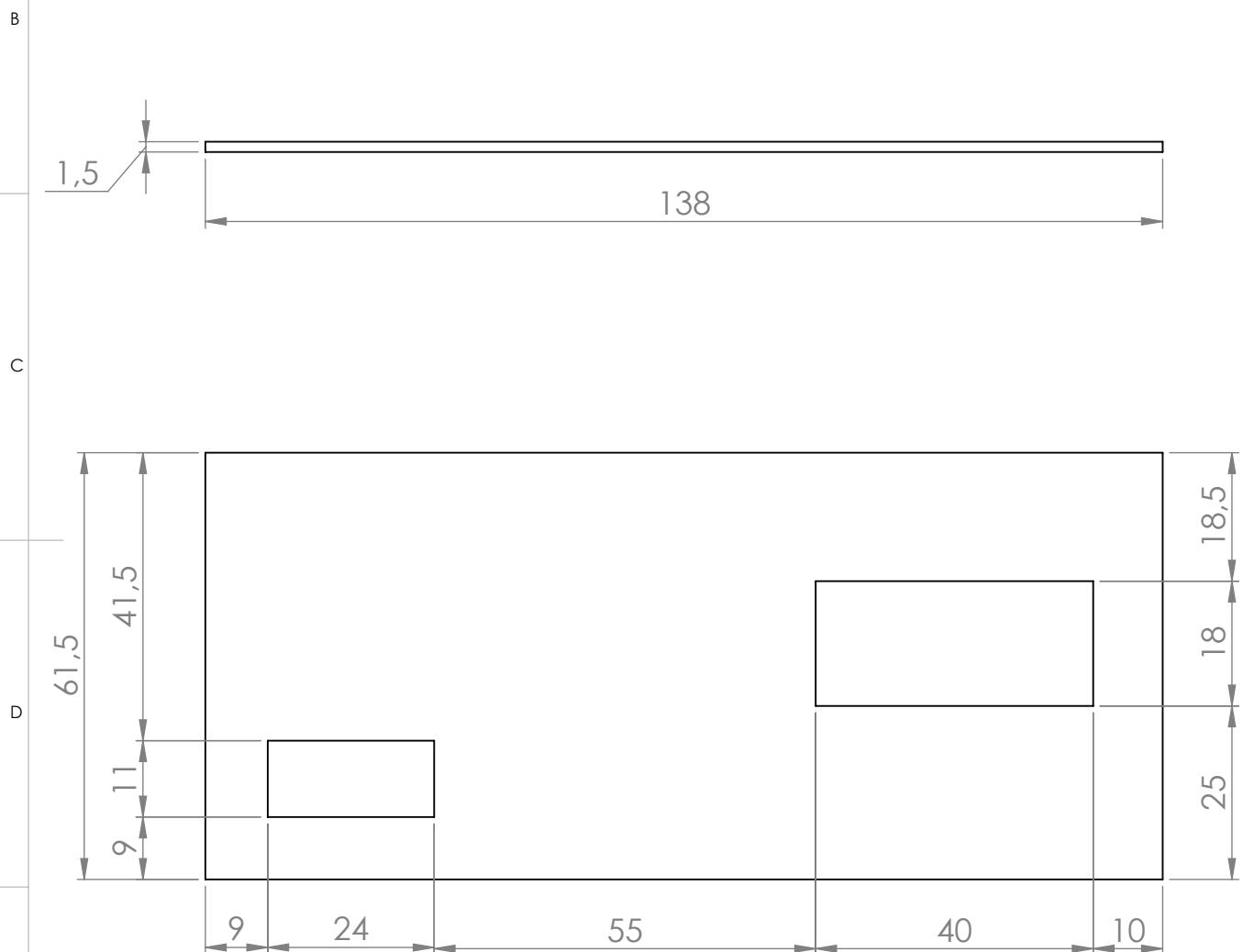
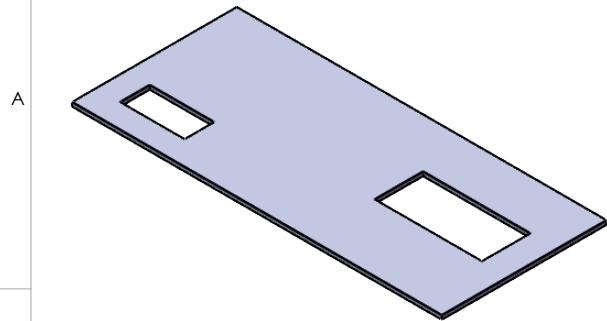
Formato:
DIN A4

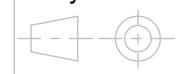
Escala:
1:1

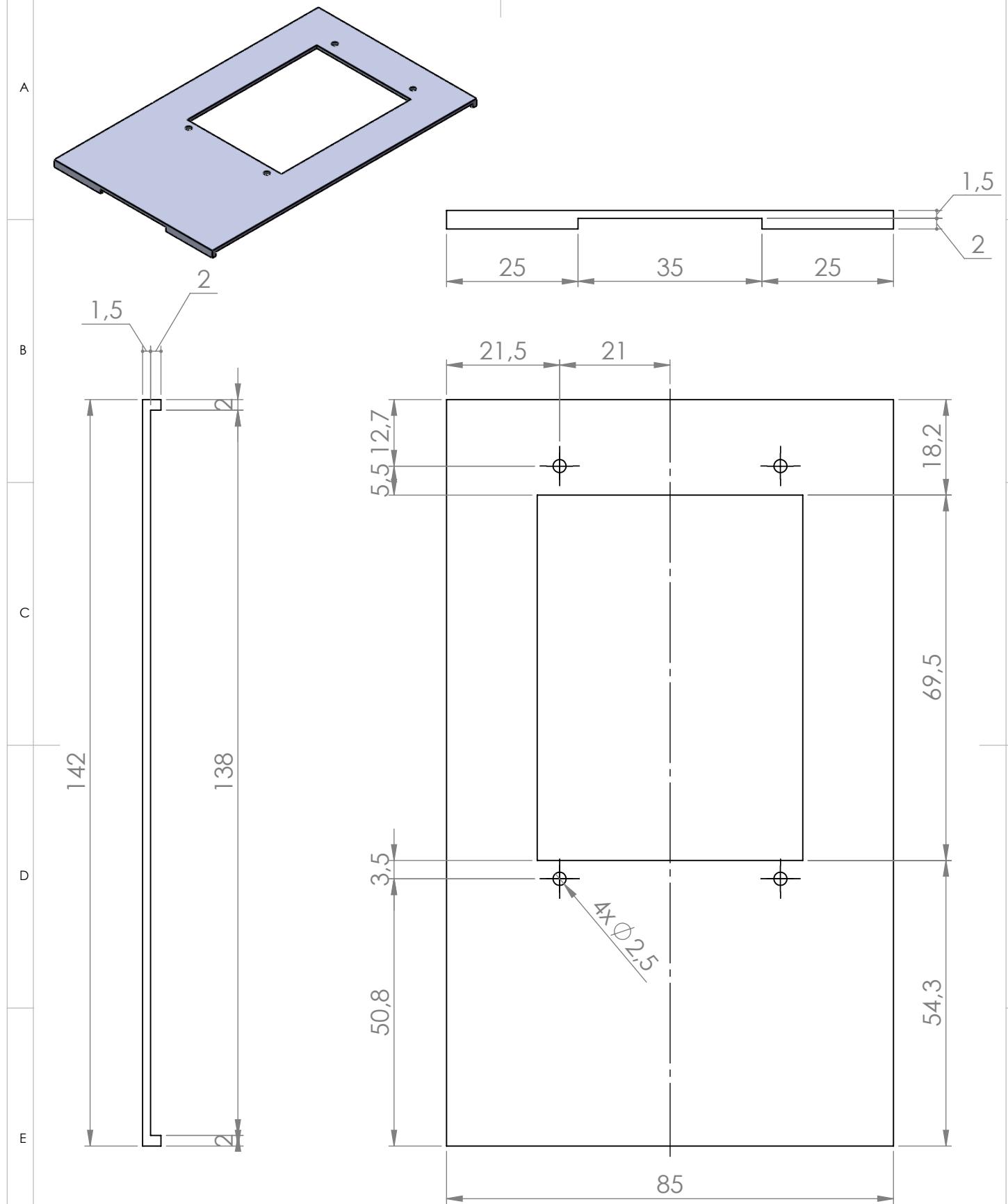
Proyección:

ATENCIÓN: no deducir cotas por medio de medición directa del plano

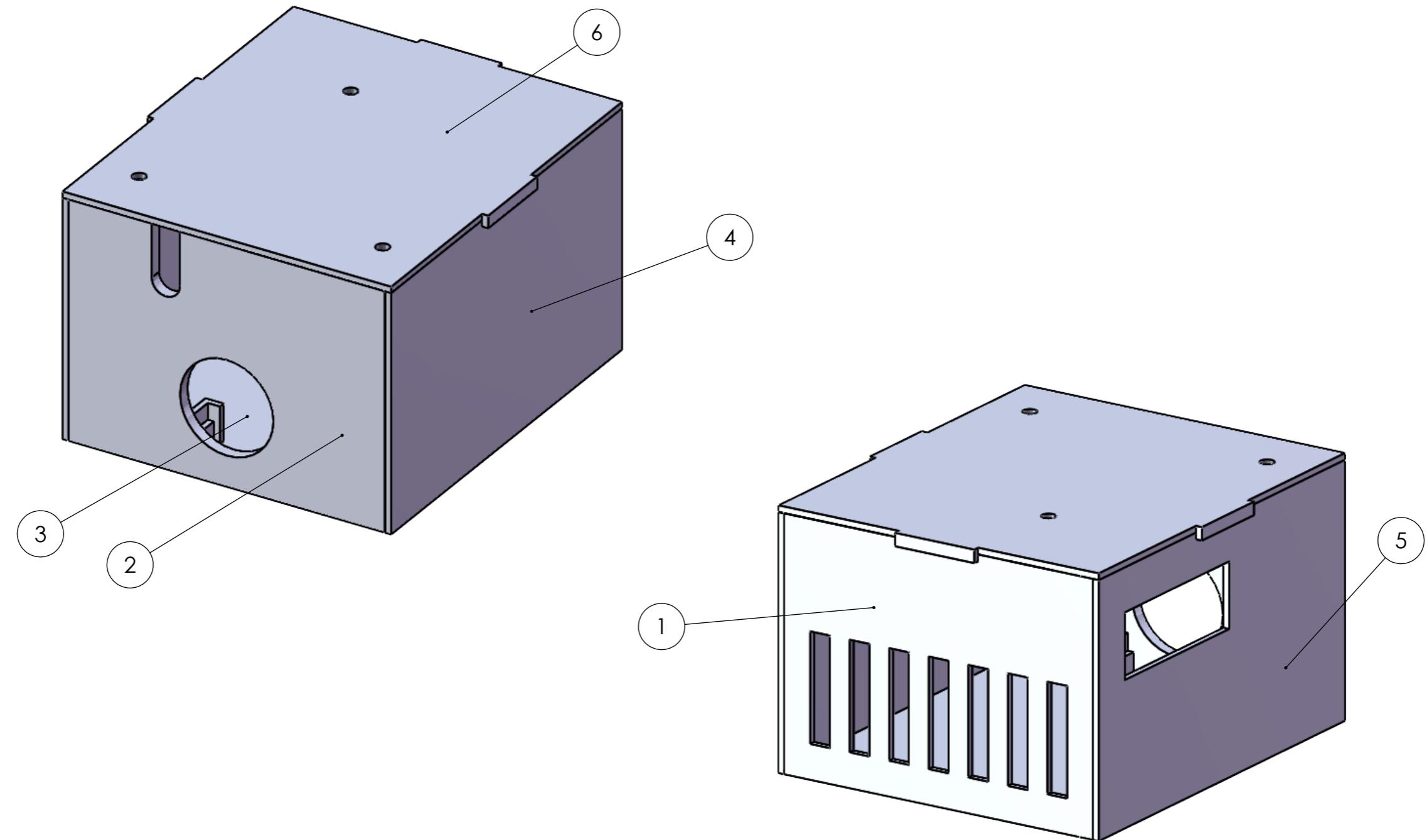
HOJA
5 / 7



Dibujado: Javier Martínez Calonge	Grupo:	Hoja: Tapa Sensores de fichero: PlanosCaja1.SLDDRW		
Revisado:		Material: PLA	Ctdad.: 1	
 PERSONA CIENCIA EMPRESA Universitat Ramon Llull	Fecha de entrega: 02/09/2023	Peso: 14gr.	Formato: DIN A4	Escala: 1:1
		ATENCIÓN: no deducir cotas por medio de medición directa del plano		Proyección:  HOJA 6 / 7



Dibujado: Javier Martínez Calonge	Grupo:	Hoja: TapaSuperiorPantalla de fichero: PlanosCaja1.SLDDRW			
Revisado:	Material: PLA	Ctdad.: 1			
 PERSONA CIENCIA EMPRESA Universitat Ramon Llull	Fecha de entrega: 02/09/2023	Peso: 17gr.	Formato: DIN A4	Escala: 1:1	Proyección: 
ATENCIÓN: no deducir cotas por medio de medición directa del plano				HOJA 7 / 7	



NO.	NAME	Material	Weight	Q	Sheet
1	TapaSalida de aire	PLA	7gr.	1	2
2	Tapa2	PLA	8gr.	1	3
3	Base	PLA	14gr.	1	4
4	TapaCerrada	PLA	11gr.	1	5
5	TapaEntradaSensor	PLA	10gr.	1	6
6	TapaSuperiorPM	PLA	15gr.	1	7

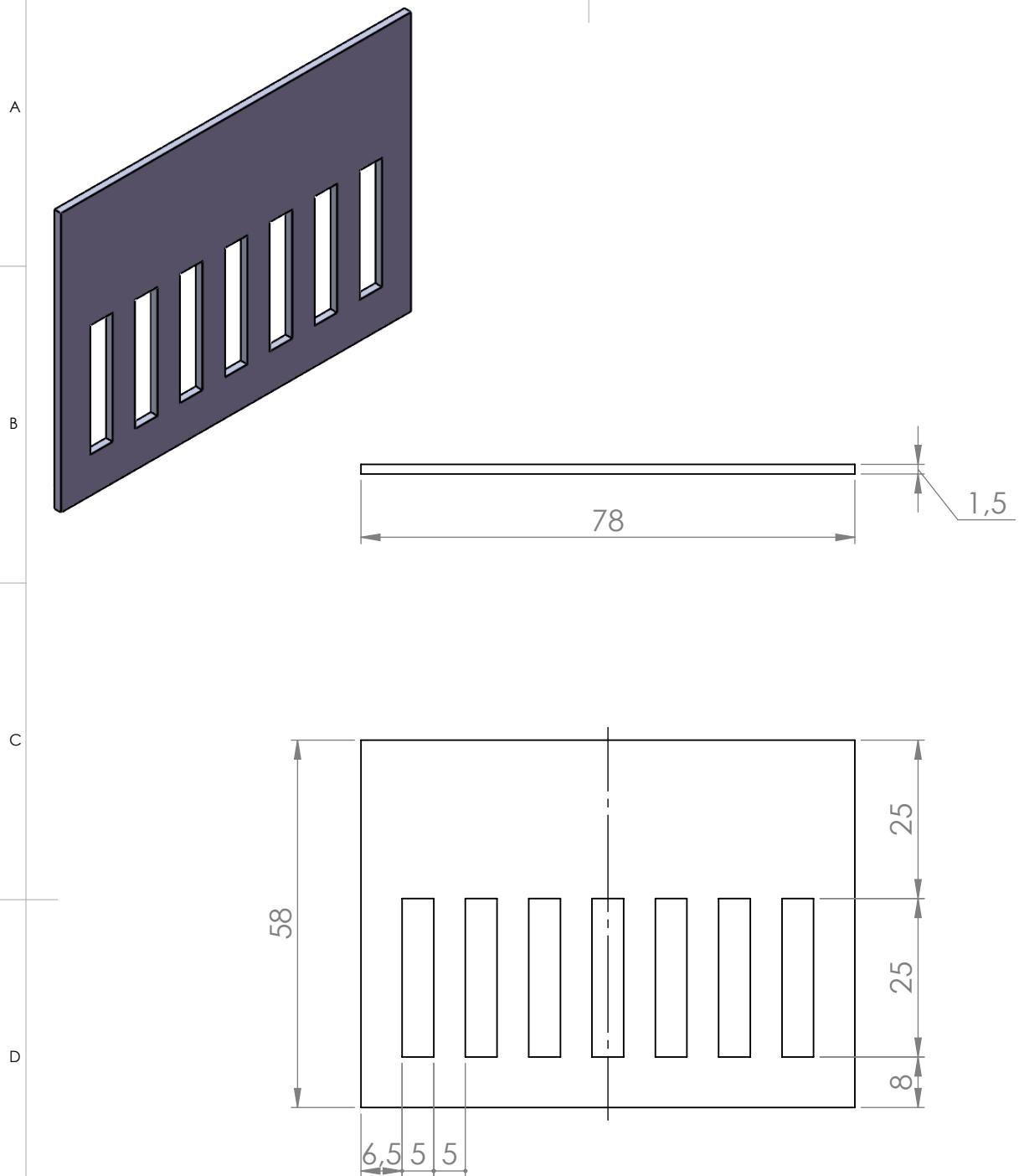
Dibujado: Grupo: Hoja: Caja 2
Javier Martínez Calonge de fichero: PlanosCaja2.SLDDRW

Revisado: Material: (Check Assembly) Ctdad.: 1



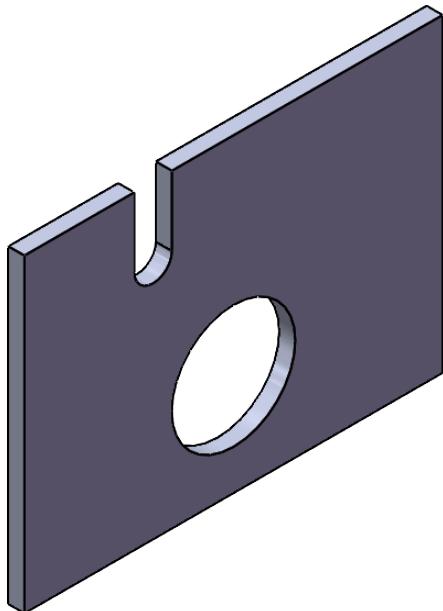
Fecha de entrega: Peso: Formato: Escala: Proyección:
02/09/2023 65gr. DIN A3 1:1

ATENCIÓN: no deducir cotas por medio de medición directa del plano HOJA 1 / 7

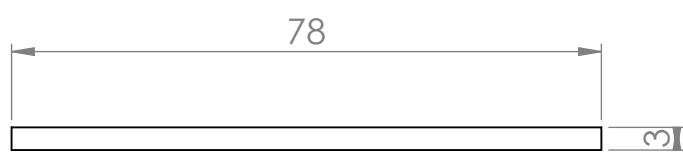


Dibujado:	Grupo:	Hoja:	TapaSalida de aire		
Javier Martínez Calonge		de fichero:	PlanosCaja2.SLDDRW		
Revisado:		Material:	PLA		
F	Fecha de entrega:	Peso:	Formato:	Escala:	Proyección:
 PERSONA CIENCIA EMPRESA Universitat Ramon Llull	02/09/2023	7gr.	DIN A4	1:1	
ATENCIÓN: no deducir cotas por medio de medición directa del plano			HOJA 2 / 7		

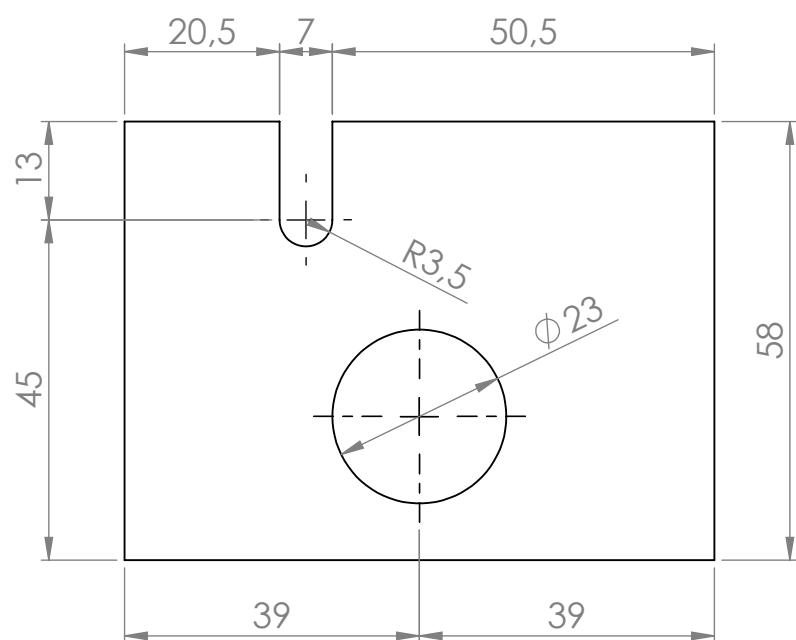
A



B



C



E

Dibujado:
Javier Martínez Calonge

Grupo:

Hoja: Tapa2
de fichero: PlanosCaja2.SLDDRW

Revisado:

Material: PLA	Ctdad.: 1
---------------	-----------



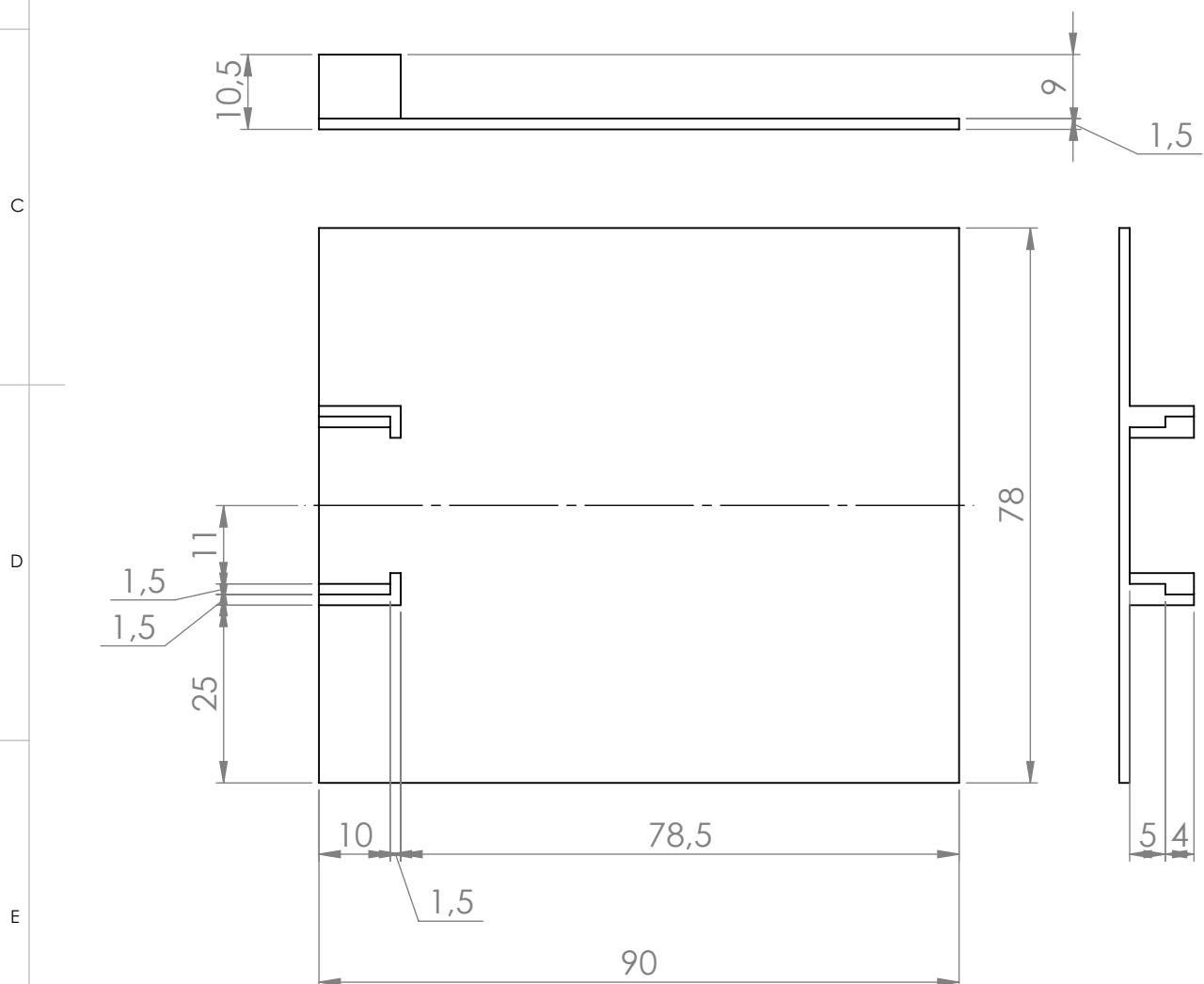
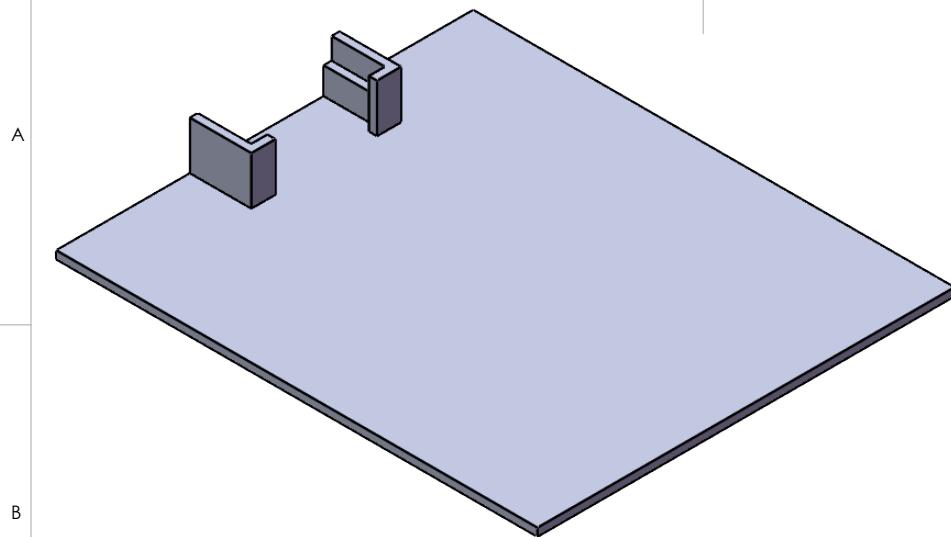
PERSONA CIENCIA EMPRESA
Universitat Ramon Llull

Fecha de entrega:
02/09/2023

Peso: 8gr.	Formato: DIN A4	Escala: 1:1	Proyección:
---------------	--------------------	----------------	-------------

ATENCIÓN: no deducir cotas por medio de medición directa del plano

HOJA
3 / 7



Dibujado: Javier Martínez Calonge Grupo: Base
de fichero: PlanosCaja2.SLDDRW

Revisado: Material: PLA Ctdad.: 1



PERSONA CIENCIA EMPRESA
Universitat Ramon Llull

Fecha de entrega:
02/09/2023

Peso:
14gr.

Formato:
DIN A4

Escala:
1:1

Proyección:

ATENCIÓN: no deducir cotas por medio de medición directa del plano

HOJA
4 / 7

A

A

B

B

C

C

D

D

E

E

Dibujado:

Javier Martínez Calonge

Grupo:

Hoja: Tapa Cerrada

de fichero: PlanosCaja2.SLDDRW

Revisado:

Material: PLA

Ctdad.: 1



PERSONA CIENCIA EMPRESA
Universitat Ramon Llull

Fecha de entrega:

02/09/2023

Peso:

11gr.

Formato:

DIN A4

Escala:

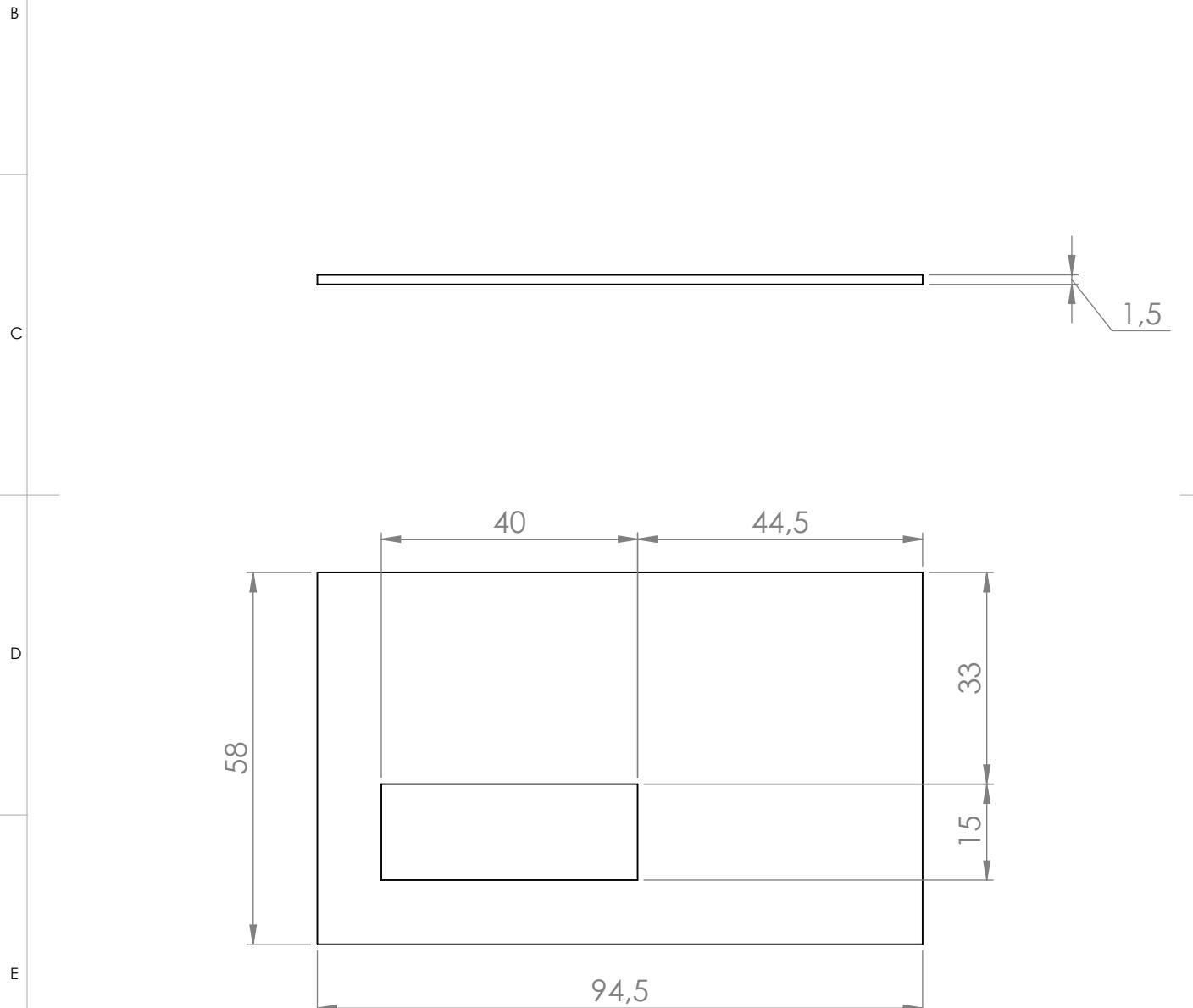
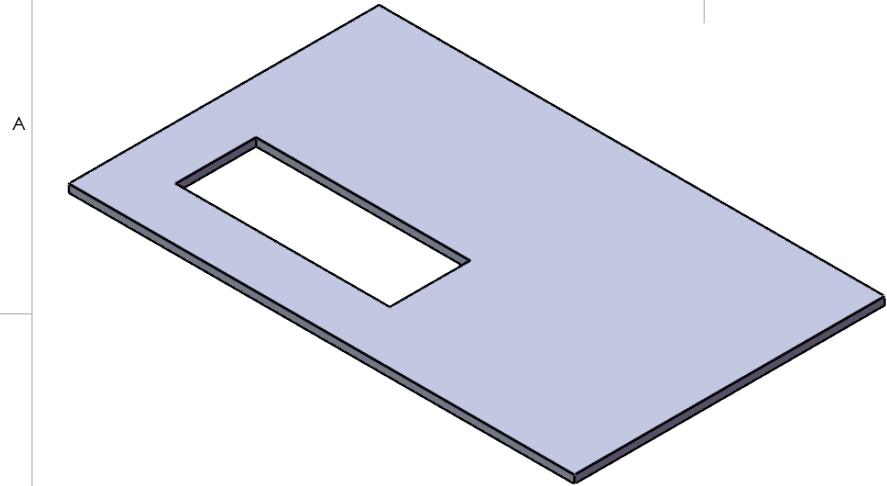
1:1

Proyección:



ATENCIÓN: no deducir cotas por medio de medición directa del plano

HOJA
5 / 7



Dibujado: Grupo: Hoja: Tapa Entrada Sensor
Javier Martínez Calonge

Revisado:

Material: PLA

Ctdad.: 1



PERSONA CIENCIA EMPRESA
 Universitat Ramon Llull

Fecha de entrega:
02/09/2023

Peso:
10gr.

Formato:
DIN A4

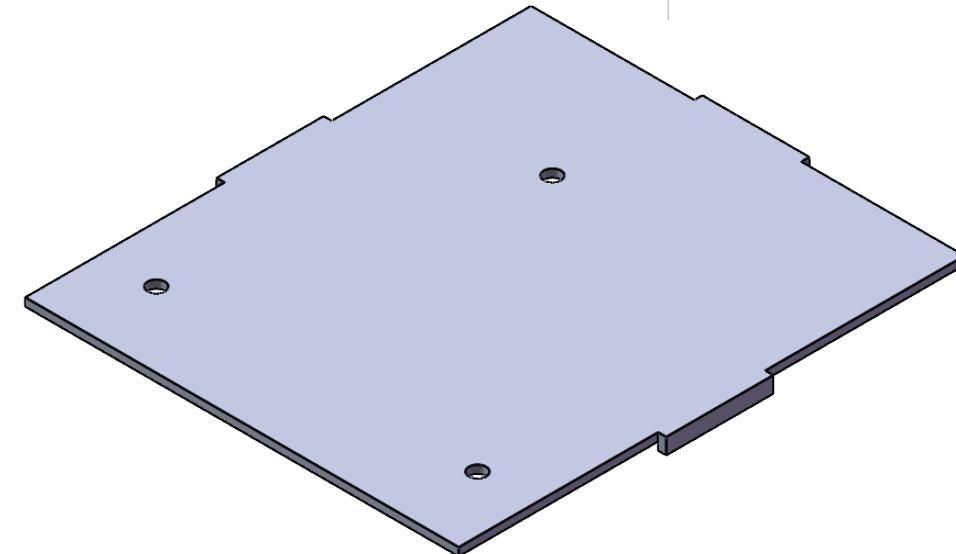
Escala:
1:1

Proyección:

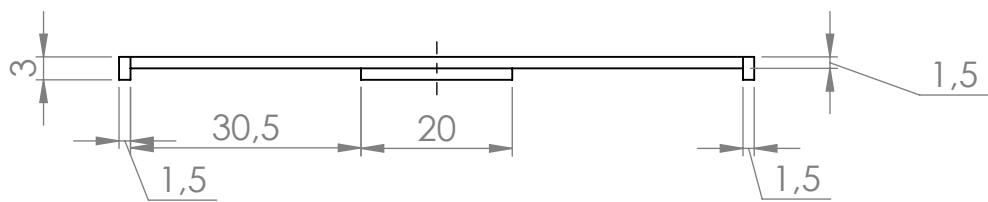
ATENCIÓN: no deducir cotas por medio de medición directa del plano

HOJA
6 / 7

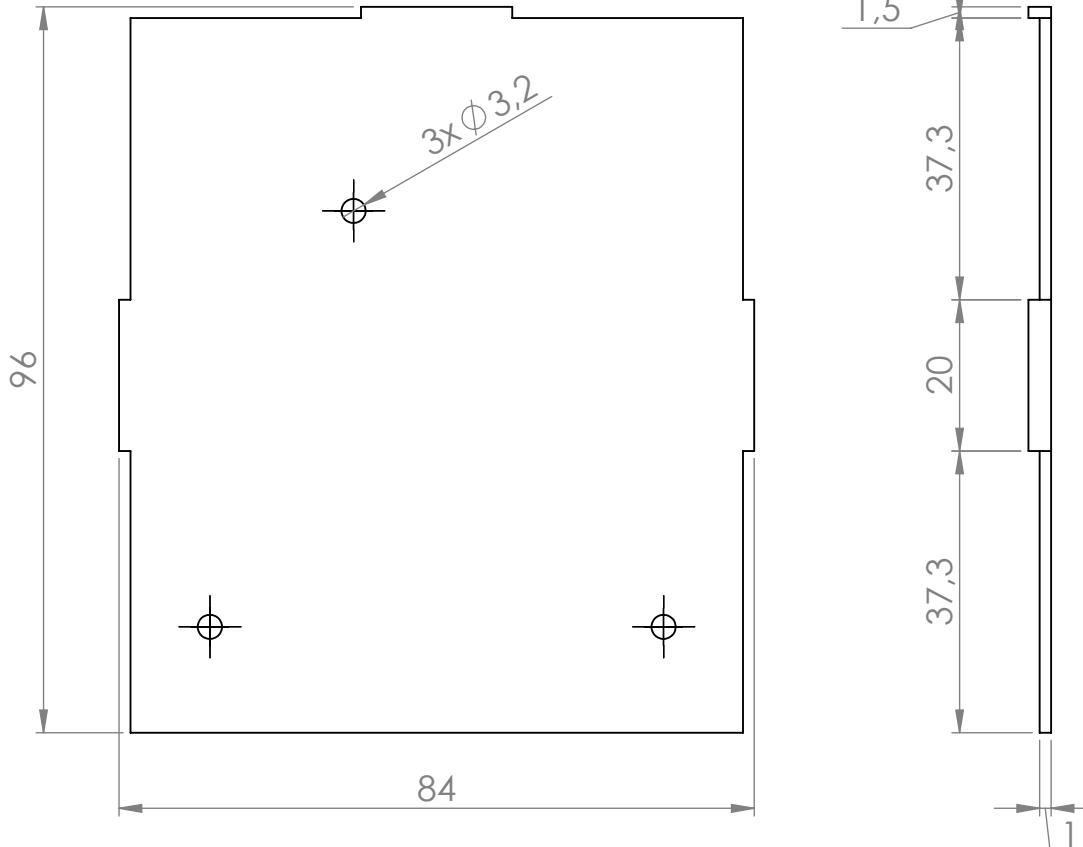
A



B



C



E

Dibujado: Javier Martínez Calonge Grupo: Hoja: Tapa Superior
de fichero: PlanosCaja2.SLDDRW

Revisado: Fecha de entrega: Material: PLA Ctdad.: 1



PERSONA CIENCIA EMPRESA
Universitat Ramon Llull

F 02/09/2023

Peso:
15gr.

Formato:
DIN A4

Escala:
1:1

Proyección:

ATENCIÓN: no deducir cotas por medio de medición directa del plano

HOJA
7 / 7